

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Ana Pilipović

Student:

Igor Zrakić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam završni rad na temu „Eksperimentalna analiza svojstava materijala za taložno očvršćivanje“ izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović i tehničkom suradniku Miodragu Kataleniću na pruženoj pomoći pri izradi ovoga rada. Svojim primjedbama i savjetima uveliku su utjecali na kvalitetu ovoga rada.

Posebno zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji, majci Jeli, ocu Anti i sestri Magdaleni, te djevojci Lei na razumjevanju i potpori tijekom izrade diplomskog rada, ali i tijekom cijelog studija.

Igor Zrakić

Sažetak

Aditivni postupci razvijeni su zbog zahtjeva tržišta za što bržom, jeftinijom i kvalitetnijom izradom proizvoda. Postupak se temelji na izradi proizvoda sloj po sloj i moguće je izraditi složene geometrijske oblike.

U okviru diplomskog rada pokušalo se ustanoviti parametre prerade za tiskanje poliamida taložnim očvršćivanjem. Na temelju pronađenih parametara, izrađena su ispitna tijela za rastezna i savojna svojstva. Na temelju podataka dobivenih ispitivanjem svojstava, dan je kritički osvrt.

Ključne riječi

aditivni postupci, mehanička svojstva, parametri prerade, poliamid, taložno očvršćivanje - FDM

Summary

Additive manufacturing have been developed due to demands for quicker, cheaper and better quality production of products. Method is based on making products layer by layer, and its possible to produce complex geometric shapes.

Within graduation thesis adequate process parameteres for printing polyamide by fused deposition modeling will be established. Based on process parameters, it will be prepared test specimens for tensile and flexible strength. Based on data obtained by testing of mechanical properties, it will be provided a criical commentary.

Keywords

additive manufacturing, fused deposition modeling - FDM, mechanical properties, polyamide, processing parameters



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Igor Zrakić**

Mat. br.: 0035180316

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalna analiza svojstava materijala za taložno očvršćivanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental analysis of properties of materials for fused deposition modeling**

Opis zadatka:

Taložno očvršćivanje materijala aditivni je postupak u kojem tvorevina nastaje izradom sloj po sloj. Materijal u obliku žice izlazi iz mlaznica ekstrudera u omekšanom stanju i očvršćuje pri sobnoj temperaturi. Nakon izrade prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu novog sloja i ekstrudira se novi sloj. Kod složenije geometrije tvorevine može se upotrijebiti potporna struktura. Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura, te zatim unutrašnjost. Za proizvodnju debelostjenih tvorevina unutrašnjost stijenke može biti popunjena različitim strukturama: puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici) i optimalna struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura).

Izrada tvorevine dobrih mehaničkih svojstava ovisi kod taložnog očvršćivanja o mnogim parametrima prerade, npr. debljini sloja, temperaturi prerade, brzini glave ekstrudera, gustoći i vrsti ispune, itd.

Kod postupka taložnog očvršćivanja najčešći materijali koji se mogu primijeniti su polilaktid (PLA) i akrilonitril/butadien/stiren (ABS) za koje su poznati parametri prerade, no u novije vrijeme pojavili su se i drugi materijali, npr. polietilen (PE), polipropilen (PP), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), itd za koje je potrebno odrediti parametre prerade.

U radu je potrebno opisati parametre prerade i opisati sve dostupne materijale koji se mogu primijeniti u postupku taložnog očvršćivanja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti parametre prerade taložnog očvršćivanja kod nekih drugih materijala koji su se pojavili na tržištu. Zatim je potrebno izraditi ispitna tijela s optimalnim parametrima prerade i ispitati mehanička svojstva.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Ana Pilipović
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

u. z. Zrakić
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

1. Sadržaj

Popis slika	I
Popis tablica	II
Popis oznaka	III
Popis kratica	IV
1. Uvod	1
2. Aditivni postupci	3
3. Postupak taložnog očvršćivanja - FDM	7
3.1 Parametri tiskanja	9
3.3.1 Orijentacija	9
3.3.2 Broj ljuski	9
3.3.3 Ispuna	10
3.3.4 Brzina	11
3.3.5 Temperatura	11
3.3.6 Debljina sloja	12
3.4 Materijali koji se upotrebljavaju u postupku taložnog očvršćivanja	12
4. Eksperimentalni dio	25
4.1 MakerBot Replicator 2X	25
4.2 Materijal poliamid PA6	26
4.3 Izrada ispitnih tijela	27
4.4 Oblici ispitnih tijela	31
4.4.1 Oblik ispitnog tijela za određivanje rasteznih svojstava [24]	31
4.4.2 Oblik ispitnog tijela za određivanje savojnih svojstava [25]	34
4.5 Uređaj za mjerenje mehaničkih svojstava	37
4.6 Ispitivanje rasteznih svojstava	38
4.7 Ispitivanje savojnih svojstava	40
4.8 Komentar rezultata	42
5. Zaključak	44
6. Literatura	45
7. Prilog	47

Popis slika

Slika 2.1. Postupak izrade proizvoda.....	3
Slika 2.2. Prikaz gotovog modela i modela STL-a	4
Slika 2.3. Prikaz nizanja slojeva	5
Slika 3.1. Postupak taložnog očvršćivanja.....	7
Slika 3.2. Ekstruder	8
Slika 3.3. Prikaz različitih vrijednosti broja ljuski	9
Slika 3.4. Prikaz različitih vrijednosti postotka ispune modela	10
Slika 3.5. Ispune modela	10
Slika 3.6. Primjer proizvoda napravljenog od ABS-a	13
Slika 3.7. Primjeri proizvoda napravljenog od PC	14
Slika 3.8. Primjeri proizvoda napravljenog od PC-ABS	14
Slika 3.9. Primjer proizvoda napravljenog od PA.....	15
Slika 3.10. Primjeri proizvoda napravljenog od PLA.....	16
Slika 3.11. Primjer proizvoda napravljenog od PET	17
Slika 3.12. Primjer proizvoda napravljenog od PVA (bijeke boje).....	18
Slika 3.13. Primjer proizvoda napravljenog od TPU	19
Slika 3.14. Primjer proizvoda napravljenog od PP	20
Slika 3.15. Primjer proizvoda napravljenog od PMMA-a.....	20
Slika 3.16. Primjer proizvoda izrađenog drvo-plastomernim kompozitom	21
Slika 3.17. Primjer modela izrađen keramičkim kompozitom	23
Slika 4.8. <i>MakerBot Replicator 2X</i>	25
Slika 4.9. Polimerna žica – PA6.....	26
Slika 4.10. Prvi pokušaj tiskanja	27
Slika 4.11. Drugi pokušaj tiskanja	28
Slika 4.12. Treći pokušaj tiskanja	28
Slika 4.13. Prikaz raslojavanja slojeva i stvaranje mjehurića na površini.....	29
Slika 4.14. Sušenje materijala	29
Slika 4.15. Ispitna tijela unutar radne komore pisača	30
Slika 4.16. Ispitna tijela	30
Slika 4.1. Krivulje dijagrama naprezanje – istezanje.....	31
Slika 4.2. Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja.....	33
Slika 4.3. Krivulja savojnog naprezanja - istezanja i progib S.....	34
Slika 4.4. Oblik ispitnog tijela za savojna ispitivanja	35
Slika 4.5. Kidalica	37
Slika 4.6. Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava	38
Slika 4.7. Čeljusti za ispitivanje savojnih svojstava.....	38
Slika 4.17. Ispitivanje rasteznih svojstava.....	39
Slika 4.18. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje za PA.....	40
Slika 4.19. Ispitivanje savojnih svojstava	41
Slika 4.20. Dijagram savojno naprezanje – istezanje za PA.....	42

Popis tablica

Tablica 2.1. Materijali i debljina slojeva	6
Tablica 3.1. Parametri za tiskanje ABS-a	13
Tablica 3.2. Parametri za tiskanje PC-a.....	14
Tablica 3.3. Parametri za tiskanje PC-ABS-a	15
Tablica 3.4. Parametri za tiskanje PA-a.....	15
Tablica 3.5. Parametri za tiskanje PLA-a.....	16
Tablica 3.6. Parametri za tiskanje PET-a.....	17
Tablica 3.7. Parametri za tiskanje PVA-a	18
Tablica 3.8. Parametri za tiskanje TPU-a	19
Tablica 3.9. Parametri za tiskanje PP-a.....	20
Tablica 3.10 Parametri za tiskanje PMMA-a.....	21
Tablica 3.11. Parametri za tiskanje drveno - plastomernih kompozita.....	22
Tablica 3.12. Parametri za tiskanje keramičkih kompozita	22
Tablica 3.13. Svojstva proizvoda izrađena postupkom taložnog očvršćivanja.....	24
Tablica 4.2. Specifikacije <i>MakerBot 2X Replicator</i>	26
Tablica 4.3 Parametri proizvođača	27
Tablica 4.1 Dimenzije ispitnog tijela.....	32
Tablica 4.4 Rezultati rasteznog ispitivanja.....	39
Tablica 4.5. Rezultati savojnog ispitivanja	41
Tablica 4.6. Usporedba svojstava PA ovisno o preradi	42
Tablica 7.1 Prikaz širine i debljine ispitnih tijela kod rasteznog ispitivanja.....	47
Tablica 7.2 Prikaz širine i debljine ispitnih tijela kod savojnog ispitivanja	47

Popis oznaka

oznaka	jedinica	opis
A	mm^2	površina
b	mm	širina
b_1	mm	širina dijela koji se steža u čeljusti uređaja
b_2	mm	širina uskog dijela, tj. ispitnog tijela
E	MPa	modul rastezljivosti
E_f	MPa	modul savitljivosti
F	N	sila
h	mm	debljina
L_0	mm	početni razmak oslonaca
L_0	mm	mjerna duljina
L	mm	razmak oslonaca
L	mm	početna udaljenost između čeljusti uređaja
l_1	mm	duljina uskog paralelnog dijela
l_2	mm	udaljenost između proširenog dijela
l_3	mm	ukupna duljina
S	mm	progib
S_c	mm	dogovoreni progib
R	MPa	rastežno naprezanje
R_r	MPa	granica razvlačenja
R_x	MPa	konvencionalna granica razvlačenja
R_m	MPa	rastezna čvrstoća
R_p	MPa	prekidna čvrstoća
r	mm	polumjer
v	mm/min	brzina ispitivanja
Δl	mm	produljenje
σ_f	MPa	savojno naprezanje
σ_{fc}	MPa	dogovorena granica savijanja
σ_{fm}	MPa	savojna čvrstoća
σ_{fp}	MPa	prekidno savojno naprezanje
ε	%	istezanje
ε_f	%	savojno istezanje
ε_k	%	konačno istezanje
ε_p	%	prekidno istezanje
ε_u	%	ukupno istezanje

Popis kratica

kratica	opis
3DP	trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D printing</i>)
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
AM	aditivna proizvodnja (e. <i>Additive Manufacturing</i>)
AMF	datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (e. <i>Additive Manufacturing File</i>)
ASTM	Američka organizacija za ispitivanje i materijale (e. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
C ₃ H ₃ N	akrilonitril
C ₄ H ₆	butadien
C ₈ H ₈	stiren
CAD	konstruiranje pomoću računala (e. <i>Computer Aided Design</i>)
DLP	očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. <i>Digital Light Processing</i>)
EtO	plin etilen oksid (e. <i>ethylene oxide gas</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MIT	Institut za tehnologiju u Massachusettsu (e. <i>Massachusetts Institute of Technology</i>)
PA	poliamid
PC	polikarbonat
PCL	polikaprolakton
PE	polietilen
PEEK	poli(eter-eter-keton)
PET	poli(etilen-tereftalat)
PE-HD	polietilen visoke gustoće
PE-LD	polietilen niske gustoće
PLA	polilaktid
PMMA	poli(metil-metal krilat)
PP	polipropilen
PPSF/PPSU	poli(fenilen-sulfon)
PVA	poli(vinil-amid)
SLA	stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i>)
SLS	selektivno lasersko sraščivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	triangulizacijska datoteka (e. <i>Standard Tessellation Language</i>)
TPU	elastoplastomerni poliuretan
UV	ultravioletno zračenje

1. Uvod

"Vrijeme je novac." - rečenica je koja se često upotrebljava u praksi. Ekonomski uspjeh proizvodnje ovisi o mogućnostim prepoznavanja tržišta i sposobnosti da se proizvod što prije razvije i plasira na tržište. Uspješan razvoj proizvoda je onaj pod kojim će se napraviti proizvod visoke kvalitete pri niskim troškovima proizvodnje u što kraćem vremenu. U cilju postizanja da proizvod bude što jeftiniji, sigurniji, kvalitetniji i poželjniji poduzeća su prisiljena unaprijediti svoje postupke kako bi bile konkurentne na tržištu. Vrijeme, kvaliteta i cijena te spremnost na brzo reagiranje na zahtjev tržišta važni su čimbenici za uspjeh.

Veliku pomoć u ostvarivanju tog cilja omogućuje aditivna proizvodnja (e. *Additive manufacturing* - AM). Prema normi F42, Američke organizacije za ispitivanje i materijale (e. *American Society for Testing and Materials* - ASTM), naziv *Aditivna proizvodnja* se usvaja kao jedinstven naziv za sve postupke koje na temelju računalnog 3D modela izrađuju fizički model uzastopnim dodavanjem materijala sloj po sloj. [1]

AM postupci razvijaju se od 1980-ih. Njihov cilj nije bio masivna proizvodnja nego izrada prototipa kako bi se utvrdili nedostaci i razjasnile nedoumice prije serijske proizvodnje. Tvrtka *3D Systems* iz Kalifornije, prva je tvrtka koja je 1986. godine, pomoću postupka stereolitografije (e. *stereolithography* - SLA) načinila proizvod. Standardni format datoteke za 3D ispis postaje STL datoteka (e. *Standard Tessellation Language*). Prvi 3D pisac u boji razvijen je 1992. godine na MIT – u, a komercijalno je postao dostupan od strane američke tvrtke *ZCorp* 1996. godine. [1]

Primjena AM postupaka je raznolika; primjenjuju se za izradu modela, funkcionalnih dijelova, manjih proizvodnih serija u automobilske, zrakoplovne i svemirske industriji te u medicini i stomatologiji.

Podjela AM postupaka se vrši prema materijalima koji se primjenjuju. Postupci proizvodnje laminiranih objekata (e. *Laminated Object Manufacturing* - LOM) i taložnog očvršćivanja (e. *Fused Deposition Modeling* - FDM) primjenjuju čvrste materijale, stereolitografija (e. *Stereolithography* - SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *Digital Light Processing* - DLP) i ispisivanje

mlazom polimera (e. *PolyJet*) primjenjuju kapljevite materijale dok selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering - SLS*) i 3D tiskanje (e. *3D Printing - 3DP*) primjenjuju prah. [1]

Ovisno o namjeni pojedinog proizvoda bira se i vrsta izrade. Pored traženih svojstava koje proizvod mora imati, vrsta materijala i mogućnosti stroja važni su čimbenici.

2. Aditivni postupci

Postupak izrade proizvoda (slika 2.1) pomoću aditivnih postupaka možemo podijeliti u faze:

- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku i rezanje u slojeve
- prebacivanje STL datoteke na AM stroj
- izrada proizvoda
- vađenje proizvoda iz stroja
- naknadna obrada (ako je potrebna)
- primjena



Slika 2.1. Postupak izrade proizvoda [3]

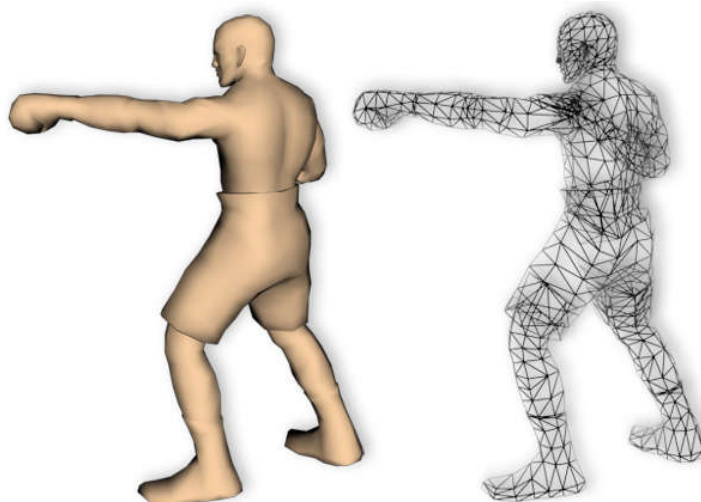
Prvi korak u razvoju proizvoda je ideja kako bi neki proizvod trebao izgledati i koja bi bila njegova funkcija. Osnovni uvjet za izradu proizvoda pomoću AM postupaka je taj da je proizvod modeliran kao CAD model.

Dva su načina pomoću kojih možemo izraditi CAD model: izradom novog modela pomoću računala ili 3D skenerom pomoću kojeg skeniramo već postojeći model. Tako dobiveni 3D model prvo se prebacuje u STL datoteku.

STL datoteka se sastoji od mreže malih trokuta i tako aproksimira geometriju tijela. Konačan cilj je transformacija iz vektorskog zapisa u raster zapis. Da bi se geometrija uspješno definirala, trokuti se moraju u potpunosti nadovezivati jedan na drugoga, bez otvora ili međusobnih preklapanja. Kod većine modela postoji povezanost između veličine detalja i veličine datoteke. Oblaganje bilo koje zakrivljene površine ravnim trokutima zahtijeva mnogo malih trokuta pomoću kojih se ostvaruje glatka krivulja što rezultira većom datotekom s kojom je teže upravljati. Pretvaranje iz vektorskog zapisa u raster zapis veoma često ostavlja nekoliko uobičajenih nepravilnosti, zbog čega se integritet STL datoteke provjerava posebnim softverom prije uporabe tih datoteka za ispis proizvoda. Manje greške moguće je ispraviti pomoću softvera dok veće pogreške ili pogreške koje softver nije u mogućnosti ispraviti moramo ručno ispraviti. [2]

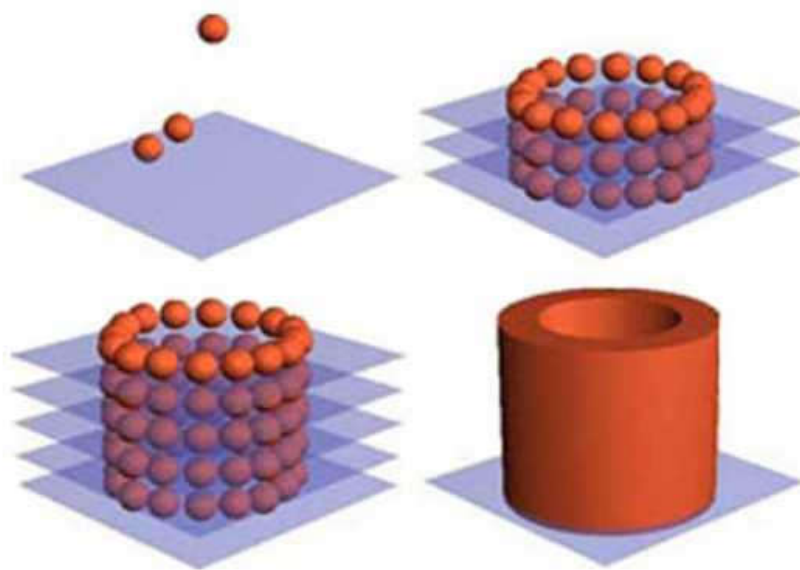
Od 2009. godine uveden je i AMF (e. *Additive Manufacturing File*) datoteka koja uz STL postaje standard za AM postupke. AMF datoteka može dati opis materijala i boje pojedinog volumena i boju svakog trokuta u mreži. [1, 2]

Slika 2.2 prikazuje gotovi model i isti taj model u STL datoteci.



Slika 2.2. Prikaz gotovog modela i modela STL-a [4]

Nakon dobivanja STL datoteke, model se reže u slojeve pomoću računalnih programa. Slojevi se slažu od najdonjega do najgornjeg (slika 2.3). Svaki od tih slojeva se može vidjeti kao tanko rezani vodoravni presjek krajnjeg modela. Prednost izgradnje po slojevima jest izgradnja kompleksnih oblika koje je klasičnim postupcima gotovo nemoguće izraditi. Također je moguća izrada kompliciranih struktura unutar modela. Postupak očvršćivanja se ponavlja za svaki sloj posebno dok se ne dobije čitav proizvod. [3]



Slika 2.3. Prikaz nizanja slojeva [5]

Kada je STL datoteka napravljena ona se prebacuje na AM stroj. Svaki AM stroj sadrži alat pomoću kojeg je moguće otvoriti STL datoteku te ju prikazati na zaslonu. Alatom je moguće manipulirati modelom, podesiti parametre, izabrati vrstu materijala, itd. Prije samog početka postupka izrade proizvoda potrebno je odrediti parametre stroja poput temperature prerade, debljine sloja i brzine.

Poslije određivanja parametara stroj kreće s izradom. Nakon što je proizvod gotov vadi se iz stroja. Ukoliko model ima potpurnu strukturu potrebno je posebno obratiti pozornost na način odvajanja koji se može razlikovati ovisno o materijalu i postupku. Poslije toga slijedi čišćenje od neželjenog materijala i naknadna obrada (poliranje, brušenje, bojanje itd.) ukoliko je potrebna. [6]

U tablici 2.1 prikazani su materijali i debljine slojeva koje se primjenjuju u različitim AM postupcima.

Tablica 2.1. Materijali i debljina slojeva [1]

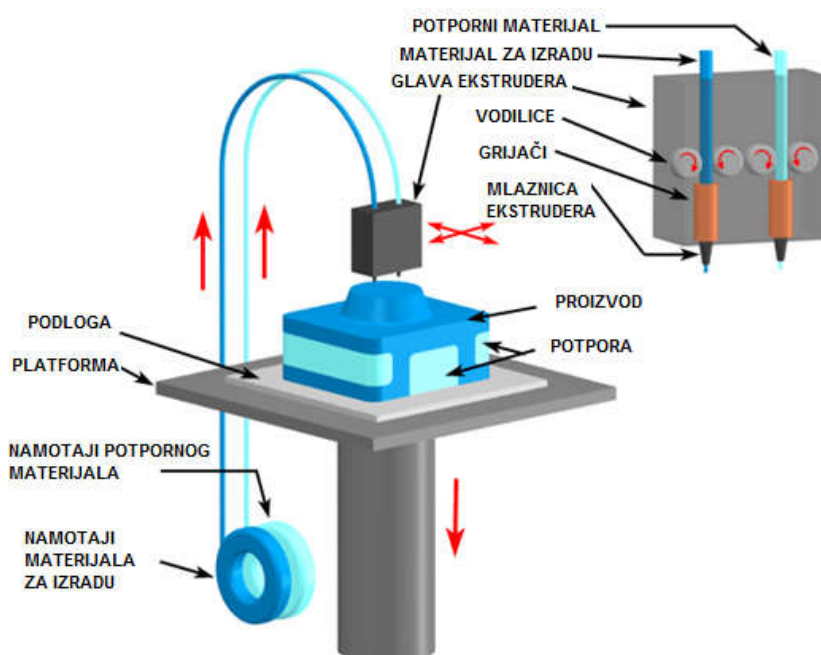
Postupak	Materijal	Debljina sloja
SLA	fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole, keramika	50 μm
SLS	polimeri, ojačani polimeri, polimeri s punilima, keramika, metal	100 - 150 μm
3DP	polimeri, keramika, gips, metali, škrob	250 μm
FDM	plastomeri, keramika	50 - 762 μm
LOM	polimer u obliku folija, papir, metalne ploče	76 - 150 μm
DLP	fotoosjetljiva polimerna smola	15 - 100 μm
PolyJet	fotoosjetljiva polimerna smola	16 - 32 μm

3. Postupak taložnog očvršćivanja - FDM

Postupak taložnog očvršćivanja aditivni je postupak koji je originalno razvijen u tvrtci *Advanced Ceramics Research (ACR)* u Tucson, Arizona, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*, Minnesota, SAD. Početna svrha bila je izrada konceptnog dizajna, no danas se primjenjuje za izradu dijelova široke namjene. Razvojem FDM postupka tijekom dva desetljeća, udio na tržištu se znatno povećao te se po nekim izvorima procjenjuje da na ukupnom tržištu aditivnih postupaka FDM zauzima preko 50 % tržišta. [1, 7]

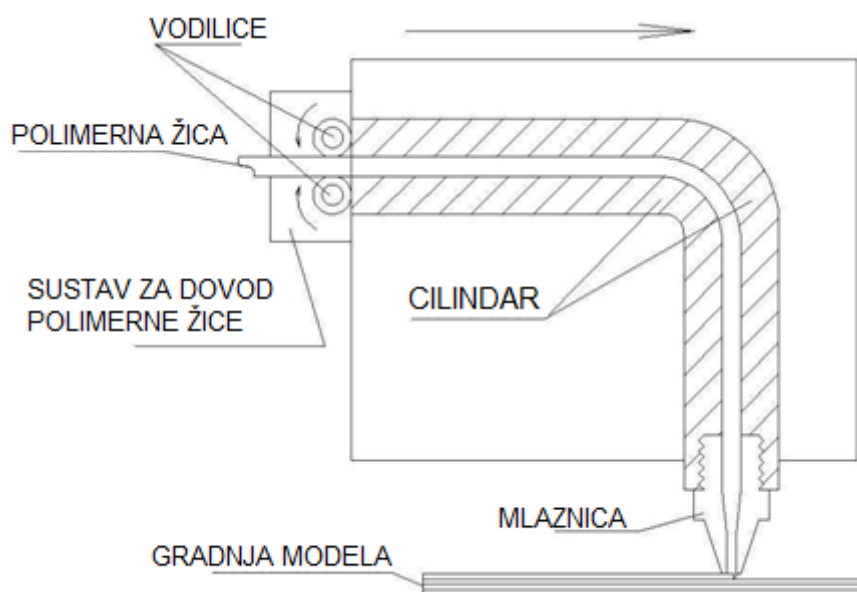
Postupak započinje od 3D CAD modela, koji je računalnim programom podijeljen u vodoravne slojeve. FDM uređaji primjenjuju vlastiti programski paket, pomoću kojeg se manipulira importiranom STL datotekom. Nakon prebacivanja, na uređaju se podešavaju temperatura zagrijavanja materijala, vrsta materijala potporne strukture, temperatura radne podloge, orijentacija modela. Modelima se najprije izrađuje vanjska kontura, te zatim unutrašnjost. [7]

Na slici 3.1 prikazani su svi bitniji dijelovi koji se upotrebljavaju pri izradi proizvoda putem taložnog očvršćivanja.



Slika 3.1. Postupak taložnog očvršćivanja [7]

Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz ekstruder (slika 3.2) u kojem se materijal zagrijava i izlazi kroz mlaznicu u omekšanom stanju te pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje. U cijelom postupku potrebno je održavati temperaturu kapljevitoog materijala iznad temperature očvršćivanja pa se zbog toga mlaznica radi od materijala koji imaju visoku toplinsku vodljivost. [7]



Slika 3.2. Ekstruder [7]

Najčešće glava ekstrudera ima pomak po xy osi dok radna podloga na kojoj se nalazi model ima pomak po osi z. Nakon izrade prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu novog sloja i ekstrudira se novi sloj. [1, 7]

Kod složenije geometrije proizvoda potrebno je upotrijebiti potpornu strukturu. Tada se primjenjuje dvostruka glava ekstrudera. U jednoj mlaznici nalazi se materijal za izradu proizvoda, a u drugoj materijal za potpornu strukturu. Kada je proizvod završen, potporna struktura se vrlo jednostavno uklanja (npr. otapanjem u otopini ili lomljenjem). S potpornom strukturom topljivom u vodenoj otopini postižu se bolje završne površine proizvoda. [1, 7]

Debljina sloja ovisi o otvoru mlaznice, doziranju materijala i brzini glave ekstrudera. Obično iznosi od 0,18 mm do 0,26 mm dok mlaznica koja polaže potporni materijal ima otvor od 0,4 - 3,8 mm. [1, 7]

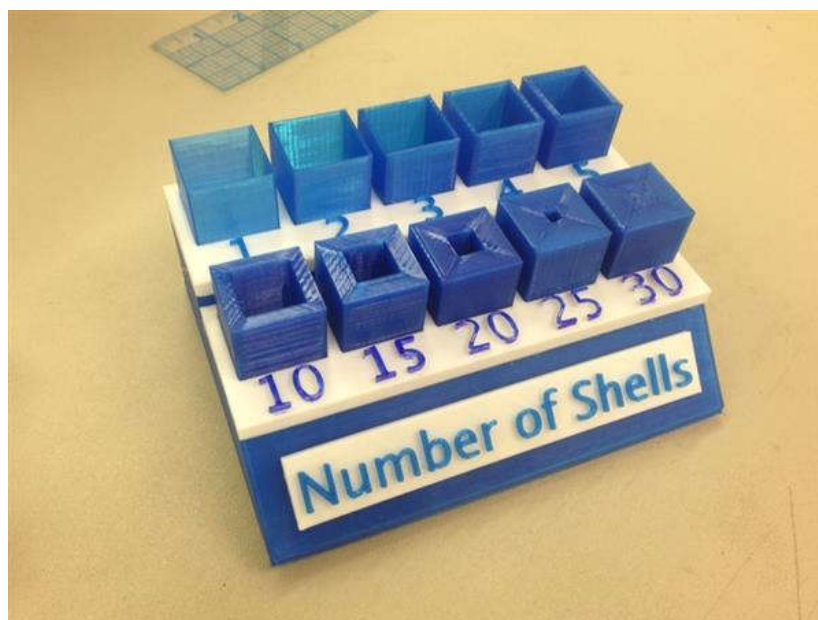
3.1 Parametri tiskanja

3.3.1 Orijentacija

Prilikom konstruiranja modela, važno je uzeti u obzir prednosti i ograničenja 3D pisača, pogotovo ako modeli moraju imati određena mehanička svojstva. Najčešća orijentacija modela je ta gdje se velike površine modela stavljaju u horizontalnu ravninu čime se povećava stabilnost i smanjuje potrošnja materijala potporne strukture. Bitni detalji modela ne smiju biti u kontaktu s drugim površinama zbog očuvanja kvalitete površine. [1, 8]

3.3.2 Broj ljuski

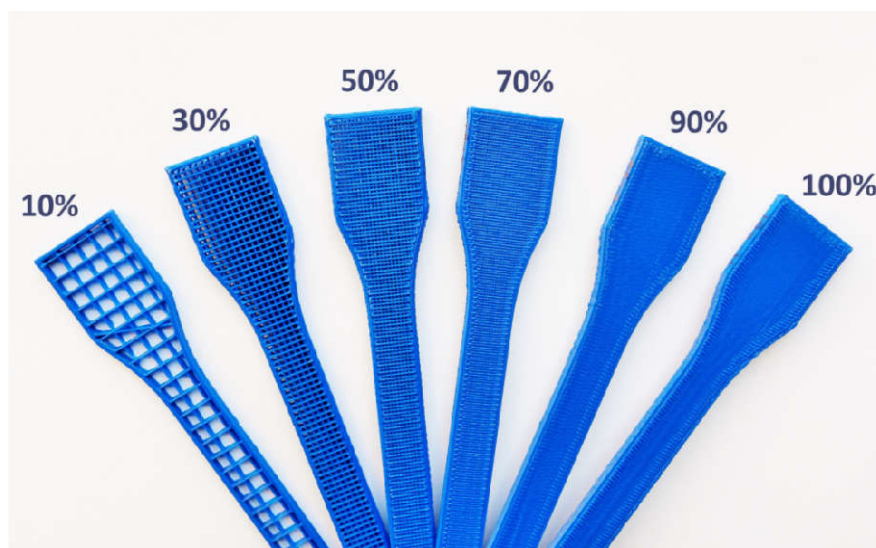
Broj ljuski je zapravo broj vanjskih kontura koje pisač napravi prije nego što krene ispunjavati unutrašnjost model. Debljina konture će ovisiti o promjeru mlaznice. Ako npr. imamo mlaznicu debljine 0,4 mm i odaberemo broj ljuski 4, debljina vanjske konture će biti 1,6 mm. Slika 3.3 prikazuje model sa različitim vrijednostima broja ljuski. [9]



Slika 3.3. Prikaz različitih vrijednosti broja ljuski [10]

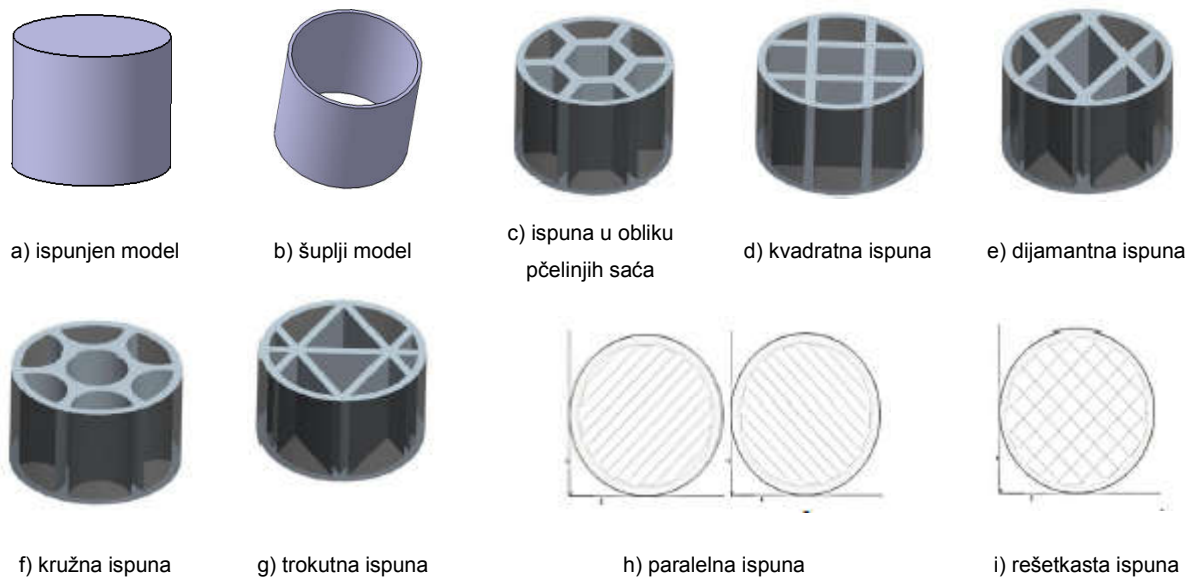
3.3.3 Ispuna

Ispuna je vrijednost koja predstavlja postotak ispune koja pokazuje koliko je model ispunjen materijalom prilikom tiskanja. Zbog cijene materijala, mase i trajanja izrade modela, uobičajeno model nije u potpunosti ispunjen materijalom osim u slučajevima kada su povećani zahtjevi za čvrstoću. Slika 3.4 prikazuje različite vrijednosti ispune modela. [9]



Slika 3.4. Prikaz različitih vrijednosti postotka ispune modela [11]

Postoji mogućnost tri načina ispune modela: ispunjen model, šuplji model i model s različitim mrežnim vezama između stijenki (slika 3.5).



Slika 3.5. Ispune modela [12]

Slika 3.5 prikazuje različite ispune i oblike mrežne strukture unutrašnjosti: ispunjen model (slika 3.5a), šuplji model (slika 3.5b), ispuna u obliku pčelinjih saća (slika 3.5c), kvadratna ispuna (slika 3.5d), dijamantna ispuna (slika 3.5e), kružna ispuna (slika 3.5f), trokutna ispuna (slika 3.5g), paralelna ispuna (slika 3.5h) te rešetkasta ispuna (slika 3.1i). Pri primjeni različitih ispuna dobivaju se različita mehanička svojstva. Najbolja mehanička svojstva pokazuju proizvodi s ispunom u obliku pčelinjih saća. Paralelna i rešetkasta ispuna je najelastičnija i izrađuje se duplo brže nego bilo koja druga ispuna i može podnijeti relativno mala naprezanja, dok struktura pčelinjih saća se radi najduže, ali zato može podnijeti velika naprezanja. [12]

3.3.4 Brzina

Iako današnji pisači mogu dosegnuti visoke brzine, sporije brzine omogućuje bolju kvalitetu površine, bolje prijanjanje slojeva te bolju kvalitetu izrađenih rubova. U obzir treba uzeti silu inercije. S obzirom da je polimerna žica pri tiskanju u omekšanom stanju, prilikom izrade proizvoda koji je valovitog oblika i prevelikih brzina, moguće je da zbog inercije sloj bude izbočen duž ruba. Isto tako, nije dobra niti prespora brzina kako se polimerna žica nebi previše zadržavala u ekstruderu i tako imala drugačija svojstva od željenih. [8, 9]

Pri postavljanju parametara brzine, razlikujemo brzinu tiskanja i brzinu kretanja. Brzina tiskanja je brzina kojom se mlaznica ekstrudera pomiče dok ekstrudira polimernu žicu. Brzina kretanja je brzina kojom se mlaznica ekstrudera kreće dok ne ekstrudira polimernu žicu. Ona je obično veća u odnosu na brzinu tiskanja.

Razlikujemo i brzinu izrade ispune te brzinu izrade kontura proizvoda, koje se podešavaju posebno. Što je veća brzina to je lošija kvaliteta površine, i obrnuto, što je brzina manja to je kvaliteta površine veća. [8, 9]

3.3.5 Temperatura

Pri postavljanju temperatura u postupku tiskanja, razlikujemo temperaturu ekstrudera i temperaturu podloge na kojoj tiskamo.

Temperatura ekstrudera je ona temperatura koja je potrebna da se polimerna žica omekša i da bi tiskanje istom bilo moguće. Ova temperatura nije ista za sve vrste materijala, elastomeri obično zahtjevaju niže temperature. [8,9]

Neke materijale nije moguće tiskati ukoliko nemamo grijanu podlogu unutar prostora za tiskanje. Grijana podloga uvelike povećava kvalitetu tiskanja jer pomaže da ekstrudirani polimerni sloj ostane zagrijan i time spriječi vitoperenje proizvoda. Do vitoperenja proizvoda dolazi kada se vanjski dio modela, zbog utjecaja okoliša, brže hladi od unutarnjeg dijela proizvoda. [8, 9]

3.3.6 Debljina sloja

Debljina sloja je parametar koji uvelike utječe na kvalitetu tiska jer definira debljinu svakog sloja prilikom izrade proizvoda. Što je sloj tanji, imamo više slojeva i kvaliteta proizvoda je veća. Pri definiranju ovog parametra treba uzeti u obzir da s povećanjem broja slojeva, odnosno manjom debljinom sloja, raste i ukupno vrijeme potrebno za tiskanje. [8, 9]

3.4 Materijali koji se upotrebljavaju u postupku taložnog očvršćivanja

ABS (akrilonitril/butadien/stiren) je mješavina amornog plastomera. Sadrži 15 % do 35 % akrilonitrila (C_3H_3N), 5 % do 30 % butadiena (C_4H_6) i 40 % do 60 % stirena (C_8H_8). U slučaju miješanja različitih udjela sastojaka, moguće je dobiti materijal različitih svojstava. Primjenjuje se u automobilske industriji i elektronici. Dostupan je u različitim bojama (bijela, crna, crvena, plava, zelena, siva, žuta, roza itd.). Svojstva pojedinih sastojaka daju svojstva ABS materijalu. Akrilonitril je toplinski i kemijski postojan, gumi sličan butadien daje duktilnost i savojnu žilavost, a stiren sjajnu površinu i omogućuje lakšu obradu materijala i nižu cijenu. [1]

Općenito, ABS ima dobru savojnu žilavost pri sniženoj temperaturi, zadovoljavajuću krutost i dimenzijsku točnost i sjajnu površinu. Ako mu se još dodaju UV stabilizatori može služiti za vanjsku primjenu. [1]

Slika 3.6 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od ABS-a.



Slika 3.6. Primjer proizvoda napravljenog od ABS-a [13]

Tablica 3.1 prikazuje osnovne parametre za tiskanje ABS-a.

Tablica 3.1. Parametri za tiskanje ABS-a [16, 17]

ABS	
Temperatura ekstrudiranja, °C	230 - 240
Grijana podloga, °C	80 - 100
Brzina tiskanja, mm/s	30 - 90
Sušenje materijala	nije potrebno

PC (polikarbonat) je materijal kojemu je čvrstoća viša za 60 % do 80 % od PC-a upotrebljavanog u postupcima injekcijskog prešanja. Posjeduje neobičnu kombinaciju čvrstoće, krutosti i žilavosti koje materijal čine pouzdanim i dobrim za primjenu. Moguće ga je primjenjivati u proizvodnji ambalaže za prehrambenu industriju, za lijekove, u automobilske industriji i za medicinske uređaje. Kao potporna struktura ne upotrebljavaju se topljivi materijali. Postoji i biokompatibilni PC koji se primjenjuje u proizvodnji ambalaže za prehrambenu industriju (npr. spremnici za razne napitke) i u medicini. Tablica 3.2 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PC-a. [1,14,15] Posjeduje neobičnu kombinaciju čvrstoće, krutosti i žilavosti koje materijal čine pouzdanim i dobrim za primjenu. Slika 3.7 prikazuje primjere proizvoda izrađenog od PC-a.



Slika 3.7. Primjeri proizvoda napravljenog od PC [16]

Tablica 3.2 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PC-a.

Tablica 3.2. Parametri za tiskanje PC-a [16, 17]

PC	
Temperatura ekstrudiranja, °C	250 - 320
Grijana podloga, °C	120 - 130
Brzina tiskanja, mm/s	30 - 120
Sušenje materijala	4h pri temperaturi 120 °C

PC-ABS je mješavina polikarbonata (PC) i ABS-a. Ta mješavina kombinira čvrstoću i postojanost pri visokim temperaturama PC-a sa savitljivošću ABS-a. Ima izvrsna toplinska i mehanička svojstva i značajno je čvršći od ABS-a. Obično se primjenjuje za izradu proizvoda u automobilske, električne, telekomunikacijske industrije i u izradi igračaka. Slika 3.8 prikazuje primjere proizvoda izrađenog od PC-ABS-a. [1]



Slika 3.8. Primjeri proizvoda napravljenog od PC-ABS [17]

Tablica 3.3 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PC-ABS-a.

Tablica 3.3. Parametri za tiskanje PC-ABS-a [18,19]

PC-ABS	
Temperatura ekstrudiranja, °C	260 - 285
Grijana podloga, °C	nije potrebna
Brzina tiskanja, mm/s	30
Sušenje materijala	1 h pri temperaturi 85 °C – 95 °C

PA (*poliamid*) vrsta je materijala niske gustoće koji je kemijski i toplinski postojan. Odlikuje ga žilavost, mogućnost tri puta većeg produljenja u odnosu na druge materijale i otpornost na zamor materijala. Primjenjuje se u svemirskoj i automobilske industriji, pri izradi dijelova pod utjecajem vibracija, proizvoda unutrašnjih obloga te kućišta za antene. Slika 3.9 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PA-a. [17]



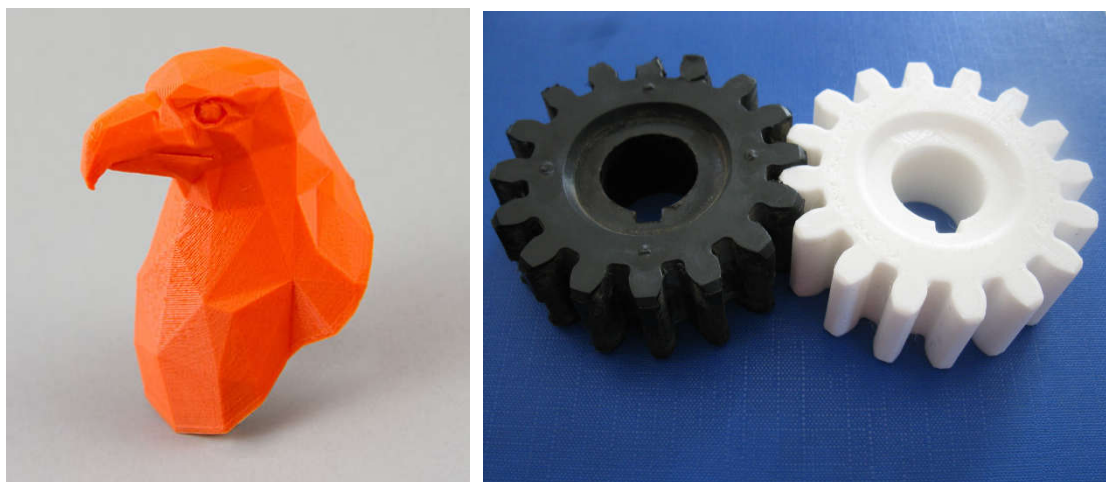
Slika 3.9. Primjer proizvoda napravljenog od PA [16]

Tablica 3.4 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PA-a.

Tablica 3.4. Parametri za tiskanje PA-a [16, 17]

PA	
Temperatura ekstrudiranja, °C	240 - 280
Grijana podloga, °C	120
Brzina tiskanja, mm/s	30 - 60
Sušenje materijala	3h – 4h pri temperaturi ~148 °C

PLA (polilaktid) je materijal koji se izrađuje od šećera dobijenog od bio-materijala. Temperatura ekstrudiranja je niža nego kod ABS-a te se ne treba primjenjivati grijana radna podloga i komora. PLA je krhak materijal, nižih mehaničkih svojstava, ne deformira se kao ABS, biorazgradiv je, niske cijene i ugodnog mirisa, ali i manje postojanosti pri visokim temperaturama. Primjenjuje se u izradi ambalaže u prehrambenoj industriji i industriji odjeće. Slika 3.10 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PLA-a. [18, 19]



Slika 3.10. Primjeri proizvoda napravljenog od PLA [20]

Tablica 3.5 prikazuje osnovne parametre za tiskanje *PLA*-a.

Tablica 3.5. Parametri za tiskanje *PLA*-a [16,17]

PLA	
Temperatura ekstrudiranja, °C	215 - 235
Grijana podloga, °C	60 - 80
Brzina tiskanja, mm/s	30 - 90
Sušenje materijala	nije potrebno

PET poli(etilen-tereftalat) je materijal kojeg odlikuje visoka savitljivost i čvrstoća. Ima višu čvrstoću nego PLA, može se u potpunosti reciklirati, a pogodan je za izradu zaštitnih oklopa mobitela, spremnika hrane i pribora za jelo. Slika 3.11 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PET-a. [16, 17]



Slika 3.11. Primjer proizvoda napravljenog od PET [21]

Tablica 3.6 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PET-a.

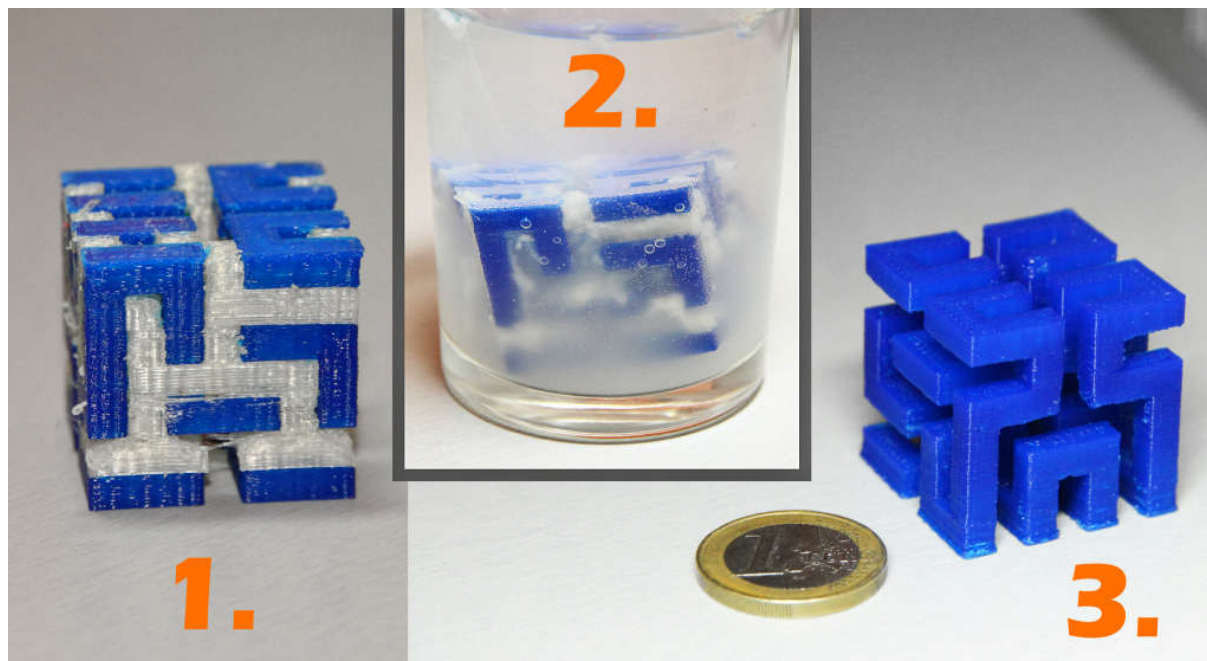
Tablica 3.6. Parametri za tiskanje PET-a [16,17]

PET	
Temperatura ekstrudiranja, °C	230 - 260
Grijana podloga, °C	60
Brzina tiskanja, mm/s	40 - 100
Sušenje materijala	nije potrebno

PVA (polivinil-amid) je poseban polimerni materijal koji se otapa u vodi. Najčešće se primjenjuje kao ljepilo za papir, kao zgušnjivač, za zaštitu higijenskih proizvoda, itd. Vrlo je rasprostranjen u ribolovu, gdje se vrećice od PVA-a pune mamcem i takve bacaju u vodu, PVA se zatim razgrađuje, a mamac privlači ribu.

Kod taložnog očvršćivanja primjenjuje se u slučajevima s dva ili više ekstrudera, kao jedan od materijala za izradu potporne strukturnu pri 3D tiskanju proizvoda s kompliciranom geometrijom. Po završetku izrade proizvod je dovoljno staviti u vodu i držati sve dok PVA nestane. Zbog jakog privlačenja vode nije jednostavno upotrebljiv, vlažnost zraka može utjecati brzo i potrebno ga je čuvati u zatvorenim

kutijama ili spremnicima, a nedostatak mu je i visoka cijena. Slika 3.12 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PVA-a. [19]



Slika 3.12. Primjer proizvoda napravljenog od PVA (bijelega boje) [21]

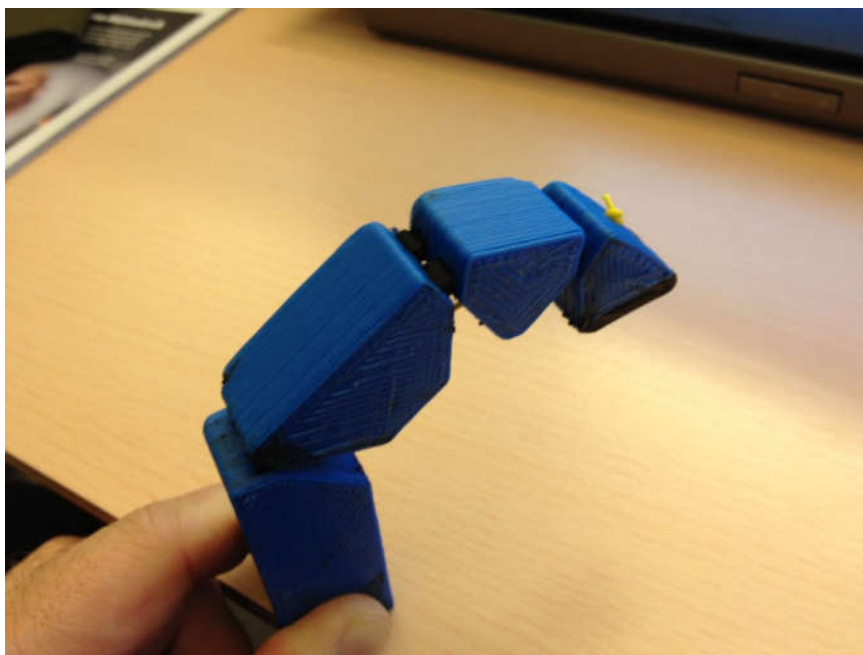
Tablica 3.7 prikazuje osnovne parametre za tiskanje PVA-a

Tablica 3.7. Parametri za tiskanje PVA-a [16, 17]

PVA	
Temperatura ekstrudiranja, °C	170 - 190
Grijana podloga, °C	45
Brzina tiskanja, mm/s	40 - 100
Sušenje materijala	nije potrebno

Elastoplastomerni poliuretan (TPU) je polimer koji u svojim lancima sadrži tvrde i mekane segmente. Njegovo glavno svojstvo je izuzetna elastičnost, koja ga čini zanimljivima za 3D tiskanje, pa se javljaju na tržištu u različitim varijantama. Druga dobra i zanimljiva svojstva uz izuzetnu elastičnosti, su smična čvrstoća, postojanost pri nižim temperaturama, postojanost na ulja, masti i otpornost na abraziju. Za niskobudžetne 3D pisace ovi materijali se još uvijek razvijaju, a njihova je pogodnost da se mogu primjeniti za remenja, brtve, proizvode za napuhivanje, kao jastučići i za apsorpiranje udaraca. Njihova svojstva omogućuju da se primjenjuju kao materijali za

tiskanje potplata cipela i tenisica te i u ostalim dijelovima modne industrije. Slika 3.13 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od TPU-a. [19]



Slika 3.13. Primjer proizvoda napravljenog od TPU [22]

U tablici 3.8 prikazani su parametri za izradu taložnim očvršćivanjem.

Tablica 3.8. Parametri za tiskanje TPU-a [16, 17]

TPU	
Temperatura ekstrudiranja, °C	210 - 225
Grijana podloga, °C	20 - 55
Brzina tiskanja, mm/s	male brzine, do 30
Sušenje materijala	nije potrebno

PP (polipropilen) je materijal koji ima široku primjenu. Ima dobra mehanička svojstva, žilav je, nije topljiv, kemijski je postojan, otporan na zamor, moguće ga je reciklirati te se primjenjuje pri izradi spremnika, čepova, dijelova za automobile. [17] Slika 3.14 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PP-a.



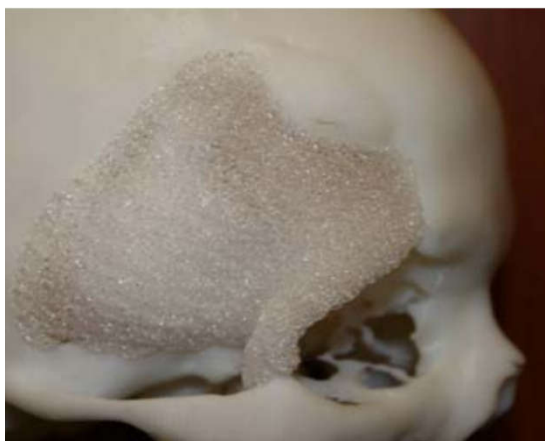
Slika 3.14. Primjer proizvoda napravljenog od PP [16]

U tablici 3.9 prikazani su parametri za izradu taložnim očvršćivanjem.

Tablica 3.9. Parametri za tiskanje PP-a [16,17]

PP	
Temperatura ekstrudiranja, °C	210 - 230
Grijana podloga, °C	120 - 150
Brzina tiskanja, mm/s	10 - 90
Sušenje materijala	nije potrebno

PMMA poli(metil-metal krilat) proziran je materijal visoke čvrstoće i krutosti, visoke tvrdoće, postojan na UV zračenje. Materijal se najčešće primjenjuje za izradu vizirne ploče instrumenata, signalne lampice, igraćaka, sanitarija. Slika 3.15 prikazuje primjer proizvoda izrađenog od PMMA-a. [16, 17]



Slika 3.15. Primjer proizvoda napravljenog od PMMA-a [23]

U tablici 3.10 prikazani su paramteri za izradu taložnim očvršćivanjem.

Tablica 3.10 Parametri za tiskanje PMMA-a [16, 17]

PMMA	
Temperatura ekstrudiranja, °C	235 - 250
Grijana podloga, °C	100 - 120
Brzina tiskanja, mm/s	30
Sušenje materijala	nije potrebno

Upotrebljavaju se i drvno-plastomerni kompoziti koji sadrže 40 % recikliranog drva i 60 % vezivnog polimera. Boja materijala ovisi o temperaturi ekstrudiranja. Ugodnog je mirisa, ima visoku čvrstoću, elastičnost i otpornost na trošenje, te se zapravo može reći da ima ista svojstva kao drvo u prirodi. Slika 3.16 prikazuje primjer proizvoda izrađenog s drveno-plastomernim kompozitom. [10]



Slika 3.16. Primjer proizvoda izrađenog drvno-plastomernim kompozitom [10]

Tablica 3.11 prikazuje osnovne parametre za tiskanje drvno – plastomernih kompozita.

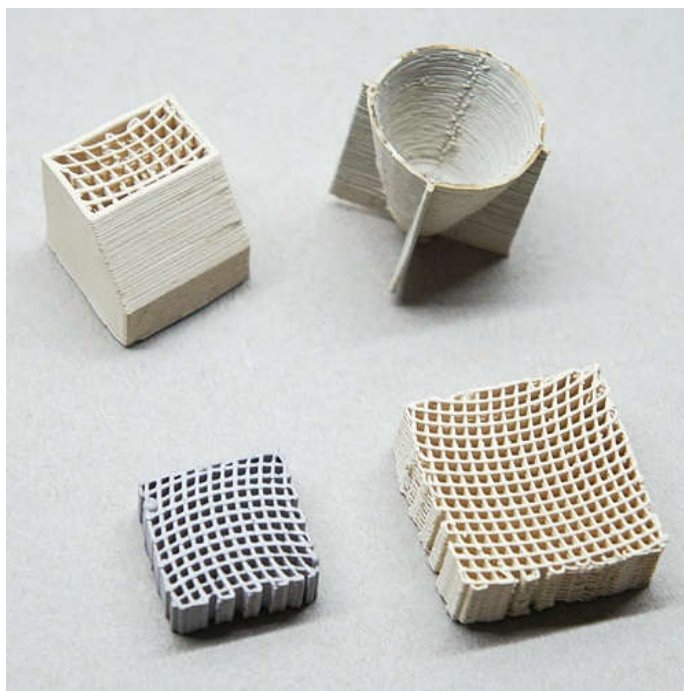
Tablica 3.11. Parametri za tiskanje drvno - plastomernih kompozita [16, 17]

drvno – plastomerni kompozit	
Temperatura ekstrudiranja, °C	165 - 180 za efekt svijetlije boje 210 - 245 za efekt tamnije boje
Grijana podloga, °C	nije potrebna
Brzina tiskanja, mm/s	30 – 60
Sušenje materijala	nije potrebno

Kao materijal je također prisutan i keramički kompozit. Kompozit je mješavina keramike i veziva koje se sastoji od voska, elastoplastomera, ojačavala i polimera (najčešće PP). Materijal ima visoku viskoznost, pa je postupak ekstrudiranja nešto sporiji od drugih. Problem kod ovog materijala je taj što se javlja skupljanje od 20 % - 30 %. Nakon izrade modela pomoću FDM-a, model je potrebno podvrgnuti visokim temperaturama, najčešće u peći, kako bi se postupak završio. Keramički kompoziti zbog svoje krhkosti trenutno služe samo pri izradi posuđa i ukrasnih predmeta (slika 3.7). Tablica 3.12. prikazuje osnovne parametre za tiskanje keramičkih kompozita. [10]

Tablica 3.12. Parametri za tiskanje keramičkih kompozita [16,17]

keramički kompozit	
Temperatura ekstrudera, °C	260 - 275
Grijana podloga, °C	20 - 55
Brzina tiskanja, mm/s	30 – 60
Sušenje materijala	nije potrebno



Slika 3.17. Primjer modela izrađen keramičkim kompozitom [10]

Primjenjuju se još i elastomer na osnovi poliestera i vosak za lijevanje. Također valja napomenuti da se intenzivno vrše istraživanja kako bi se uveli novi materijali poput metala. [1]

Prednosti FDM postupka su: brzina i sigurnost rada strojeva koji ne primjenjuju otrovne materijale pa nije potreban poseban prostor, nije potrebno čišćenje proizvoda, nije potrebno hlađenje, proizvod je moguće pjeskariti, bušiti, bojati, galvanizirati, moguće je ekstrudirati biokompatibilne i/ili biorazgradljive materijale (npr. polikaprolakton (PCL)) i elastomere, a moguće je izraditi istovremeno više proizvoda. [1]

Nedostaci FDM postupka su: potrebna je naknadna obrada, može doći do viroperenja proizvoda, vrlo često je nužna potporna struktura, nepredvidivo skupljanje materijala, oscilacije temperature mogu dovesti do raslojavanja proizvoda, vidljive su linije između slojeva, čvrstoća proizvoda je snižena u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva proizvoda, niska dimenzijska točnost (može se povećati s debljinom sloja od 0,078 mm koja je dostupna kod skupih strojeva, s tim da se povećava vrijeme izrade). Mlaznice su kružnog presjeka, te je zbog toga nemoguće izraditi oštre rubove. Stvaran oblik ovisi o mlaznici i viskoelastičnom ponašanju materijala

prilikom očvršćivanja. Brzina ovisi o mogućnostima doziranja materijala kroz mlaznicu. Pri povećanju protoka taljevine može doći do povećanja mase proizvoda. Mehanička svojstva ovise o položaju proizvoda na radnoj podlozi, pogotovo u smjeru z osi. [1]

Tehnička svojstva proizvoda izrađenih postupkom taložnog očvršćivanja prikazana su u tablici 3.13.

Tablica 3.13. Svojstva proizvoda izrađena postupkom taložnog očvršćivanja [1]

Svojstva	Vrijednosti
masa, kg	0,1 - 15
maksimalne dimenzije, mm	10 - 250
debljina presjeka, mm	0,5 - 100
promjer provrta, mm	0,4 - 20
minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
tolerancije, mm	0,127 - 2
hrapavost, μm	100 - 125

4. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio se sastoji od podešavanje parametara prerade za materijal poliamid 6 (PA 6) postupkom taložnog očvršćivanja na stroju *MakerBot Replicator 2X*. Nakon pronalaska optimalnih parametara prerade ispitana su mehanička svojstva prema normama za ispitivanje rasteznih svojstava HR EN ISO 527-2:2012 i savojnih svojstava HR EN ISO 178. Mehanička svojstva ispitana su na kidalici *Shimadzu AGS – X*.

4.1 *MakerBot Replicator 2X* [13]

MakerBot Replicator 2X spada u niskobudžetne stolne 3D pisače (slika 4.8). Za razliku od njegove prethodne verzije *MakerBot Replicator 2* on ima dvostruku glavu ekstrudera, grijanu radnu podlogu i mogućnost izrade proizvoda od ABS i PLA materijala. Prostor gdje se izrađuje model zatvoren je što omogućava lakšu regulaciju temperature i kvalitetniju izradu. Dvostruka glava omogućava istovremenu izradu proizvoda s različitim ili istim materijalima, izradu proizvoda u 2 boje, mogućnost izrade proizvoda s potpornom strukturom. Ima mogućnost tiskanja proizvoda visoke kvalitete s debljinom slojeva od 100 µm. Pisač dolazi s integriranim tvorničkim softverom *MakerWare* pomoću kojeg se lako postavljaju parametri stroja i omogućuje brzo tiskanje.



Slika 4.1. *MakerBot Replicator 2X*

U tablici 4.1 navedene su karakteristike *MakerBot 2X* stolnog pisača.

Tablica 4.1. Specifikacije *MakerBot 2X Replicatora*

radna komora	246 x 152 x 155 mm
debljina sloja	0,1 ; 0,2 ; 0,3 mm
točnost	z - os 2,5 µm, xy - osi 11 µm
debljina materijala (žice)	1,75 mm
promjer mlaznice	0,4 mm
masa	12,6 kg
softver	<i>MakerWare™ bundle 2.0</i>
formati ulaznih podataka (datoteka)	.stl, .obj., .thing
kompatibilan operativni sustav	Windows (XP/7/8), Ubuntu Linux, OSX (10)
temperatura okruženja za rad	15 °C - 32 °C
cijena	2 800 \$

4.2 Materijal poliamid PA6

Materijal koji se primjenjuje pri tiskanju ispitnih tijela je poliamid PA6 talijanskog proizvođača *Feelcolor* (slika 4.2). Poliamid je materijal koji ima visoku rasteznu i savojnu čvrstoću, čak i na tankim predmetima, te je postojan na kiseline i lužine.



Slika 4.2. Polimerna žica – PA6

Preporuka proizvođača je da se koriste parametri iz tablice 4.2 te da se na podlogu postavi samoljepljiva traka ili da se premaže adhezivnim ljepilom za bolje prijanjanje, uz napomenu da se ovi parametri mogu razlikovati ovisno o pisaču.

Tablica 4.2 Parametri proizvođača

Temperatura ekstrudiranja, °C	240 - 270
Grijana podloga, °C	70 - 80
Brzina tiskanja, mm/s	40 - 100

4.3 Izrada ispitnih tijela

Pri izradi ispitnih tijela sljedeći parametri se nisu mijenjali:

- brzina pri izradi ispune – 40 mm/min
- brzina pri izradi konture – 30 mm/min
- broj ljuski (kontura) - 3
- ispuna – 100 %
- debljina sloja – 0,3 mm

dok su parametri temperature podloge i temperature ekstrudiranja bili varijabilni.

Pri prvom pokušaju tiskanja jednostavnih oblika, kao podloga je bio upotrijebljen karton dok je temperatura ekstrudiranja postavljena na 250 °C, a temperatura podloge 75 °C. Slika prikazuje vitoperenje uz rubove proizvoda do koje dolazi zbog razlike temperature na rubovima (slika 4.3).



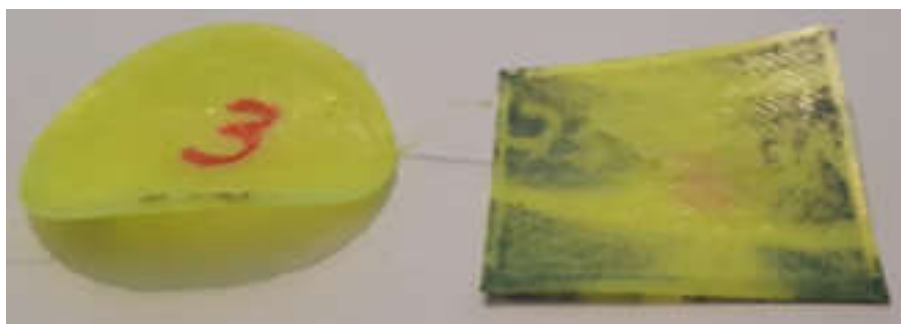
Slika 4.3. Prvi pokušaj tiskanja

Pri drugom pokušaju tiskanja jednostavnih oblika, kao podloga je bio upotrebljen karton dok je temperatura ekstrudiranja postavljena na 250 °C, a temperatura podloge 110 °C. Vitoperenje je i dalje prisutno (slika 4.4).



Slika 4.4. Drugi pokušaj tiskanja

Pri trećem pokušaju tiskanja jednostavnih oblika, kao podloga je bio upotrebljen karton dok je temperatura ekstrudiranja postavljena na 250 °C, a temperatura podloge 34 °C. Vitoperenje je jako izraženo te je zaključeno da treba podizati temperaturu podloge (slika 4.5).



Slika 4.5. Treći pokušaj tiskanja

Na podlogu je postavljena, umjesto kartona, samoljepljiva papirnatu traku jer prema iskustvu korisnika ima dobra adhezivna svojstva. Odabran je raspon temperatura ekstrudiranja između 250 °C i 280 °C, temperatura podloge između 110 °C i 135 °C te su pod tim parametrima tiskana ispitna tijela za rastezno ispitivanje. Nakon provedbe predpokusa ustanovljeno je da je potrebno postaviti višu temperaturu podloge i ekstrudiranja usporedno uputama od proizvođača. Tiskanjem ispitnih tijela pod različitim temperaturama uočena su raslojavanja između slojeva te stvaranje mjehurića na površini ispitnog tijela (slika 4.6).



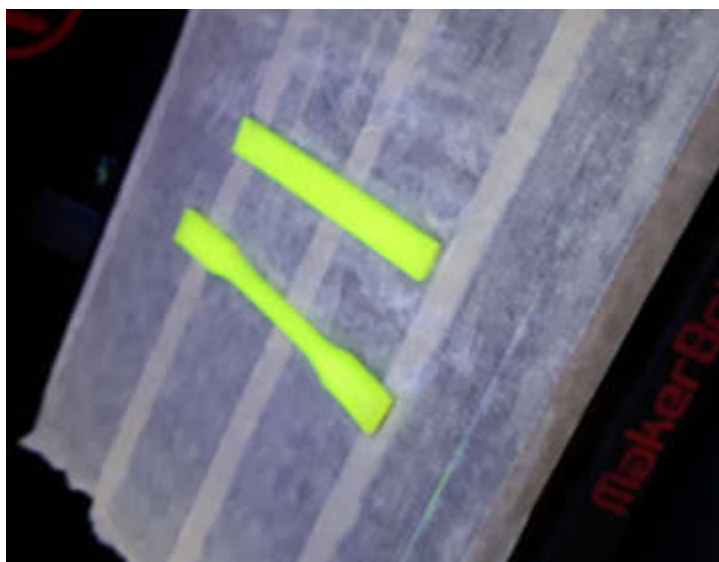
Slika 4.6. Prikaz raslojavanja slojeva i stvaranje mjehurića na površini

Takva svojstva ispitnog tijela su se pojavila zbog svojstva poliamida da upija vlagu. Bilo je potrebno osušiti materijal u peći za sušenje (slika 4.7). Parametri sušenja koji su upotrebljeni su 12 sati sušenja pri temperaturi 85 °C. Proizvođač u svojim uputama nije zadao parametre sušenja.



Slika 4.7. Sušenje materijala

Nakon sušenja nastavljeno je tiskanje ispitnih tijela pri odabranom rasponu. Raspon temperature ekstrudiranja je bio od početnih 250 °C i svako iduće tiskanje je bilo uvećano za 5 °C. Zbog ograničenja glave ekstrudera nije postavljana temperatura ekstrudiranja viša od 280 °C. Uočeno je da je vitoperenje manje na višim temperaturama ekstrudiranja i podloge. Konačni parametri tiskanja ispitnih tijela (slika 4.8) bili su: temperatura ekstrudiranja 280 °C te temperatura podloge 130 °C.



Slika 4.8. Ispitna tijela unutar radne komore pisača

Pod istim parametrima tiskana su tijela za rastezno i savojno ispitivanje (slika 4.9).

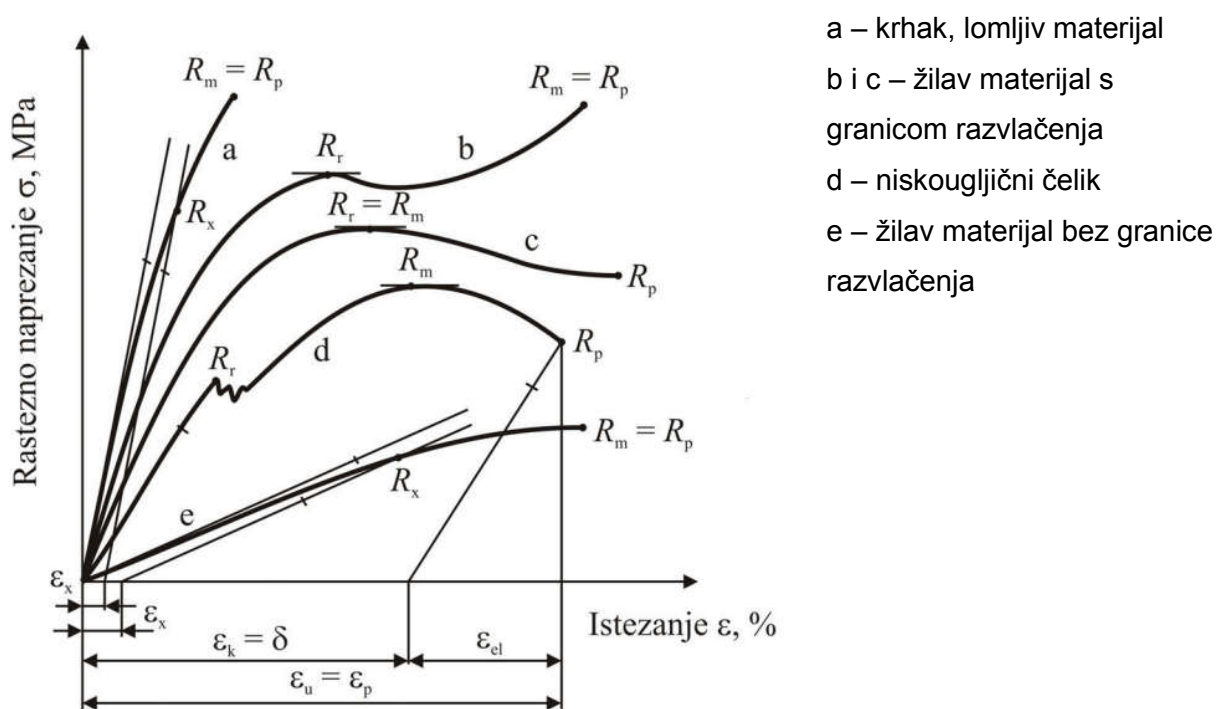


Slika 4.9. Ispitna tijela

4.4 Oblici ispitnih tijela

4.4.1 Oblik ispitnog tijela za određivanje rasteznih svojstava [24]

Prema normi HRN EN ISO 527-2:2012 određuju se rastezna svojstva plastomera (slika 4.10).



Slika 4.10. Krivulje dijagrama naprezanje – istezanje

Normom su definirane sljedeće veličine:

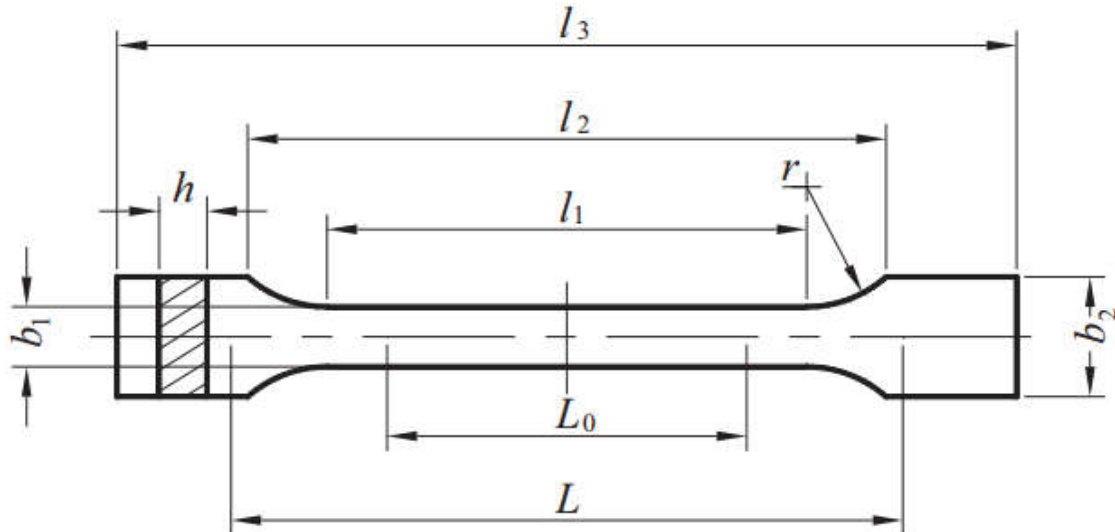
- *mjerna duljina* L_0 [mm] - je početna udaljenost između umjerne crte na središnjem dijelu ispitnog tijela
- *brzina ispitivanja* v [mm/min] – je brzina kidalice tijekom ispitivanja
- *rastezno naprezanje* R [MPa] – je rastezna sila po jedinici površine na presjeku unutar mjerne duljine, provedena na ispitnom tijelu u bilo kojem trenutku
- *granica razvlačenja* R_r [MPa] – je naprezanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konvencionalna granica razvlačenja* R_x [MPa] – je naprezanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istezanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuje granicu razvlačenja. Dogovorena vrijednost trajnog istezanja kod polimera je 0,1% ili 1%

- *rastezna čvrstoća* R_m [MPa] – je naprezanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *prekidna čvrstoća* R_p [MPa] – je naprezanje što ga izaziva prekidna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konačno istezanje, istegnuće* $\varepsilon_k = \delta$ [%] – je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine epruvete
- *prekidno ili ukupno istezanje* $\varepsilon_p = \varepsilon_u$ [%] – je omjer prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete
- *modul rastezljivosti* E [MPa] – modul rastezljivosti je omjer naprezanja $R_2 - R_1$ s odgovarajućim istezanjem $\varepsilon_2 = 0,25\%$ - $\varepsilon_1 = 0,05\%$

Prema normi je primarno određeno ispitivanje s ispitnim tijelom duljine 170 mm, ali zbog uštede na materijalu i brže izrade izabrana su isptina tijela oznake 1BA dimenzijama prema tablici 4.3 i slici 4.11.

Tablica 4.3 Dimenzije ispitnog tijela

	Dimenzije [mm]
Tip ispitnog tijela	1BA
l_3 – ukupna duljina	≥ 75
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$30 \pm 0,5$
r – polumjer	≥ 30
l_2 – udaljenost između proširenog dijela	58 ± 2
b_2 – širina dijela koji se steža u čeljusti uređaja	$10 \pm 0,5$
b_1 – širina uskog dijela, tj. ispitnog tijela	$5 \pm 0,5$
h – debljina	≥ 2
L_0 – mjerna duljina	$25 \pm 0,5$
L – početna udaljenost između čeljusti uređaja	$l_2^{+2}_0$



Slika 4.11. Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja

Za rastezna svojstva potrebno je odrediti rastezna naprezanja, istezanja i modul rastezljivosti.

Rastezno naprezanje računa se prema izrazu:

$$R = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

gdje su: R [MPa] – rastezno istezanje, F [N] – sila, A [mm²] – površina

Istezanje se računa prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} \quad (4.2)$$

gdje su ε [%] – istezanje, Δl [mm] – produljenje, l_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela

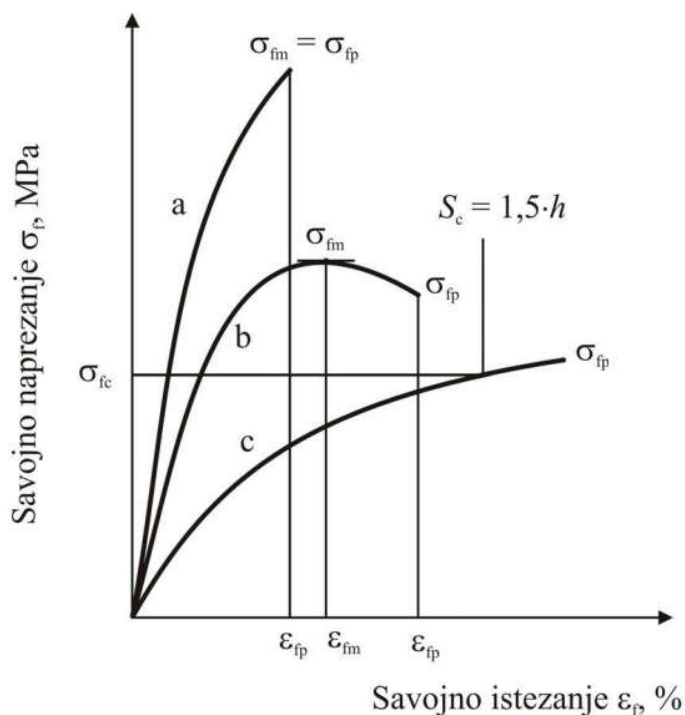
i modul rastezljivosti:

$$E = \frac{R_2}{\varepsilon_2} - \frac{R_1}{\varepsilon_1} \quad (4.3)$$

gdje su: R_2 i R_1 – rastezna naprezanja za istezanja ε_2 i ε_1 ($\varepsilon_2 = 0,25$ %, $\varepsilon_1 = 0,05$ %)

4.4.2 Oblik ispitnog tijela za određivanje savojnih svojstava [25]

Prema normi HRN EN ISO 178:2011 određuju se savojna svojstva krutih i polukrutih polimera u definiranim uvjetima.



- a – ispitna tijela koja se kidaju prije granice savijanja
- b – ispitna tijela koja postižu maksimum i onda se kidaju prije dogovorenog progiba S_c
- c – ispitna tijela koja ne postižu maksimum i ne kidaju se prije S_c

Slika 4.12. Krivulja savojnog naprezanja - istezanja i progib S

Potrebno je odrediti slijedeća svojstva (slika 4.12):

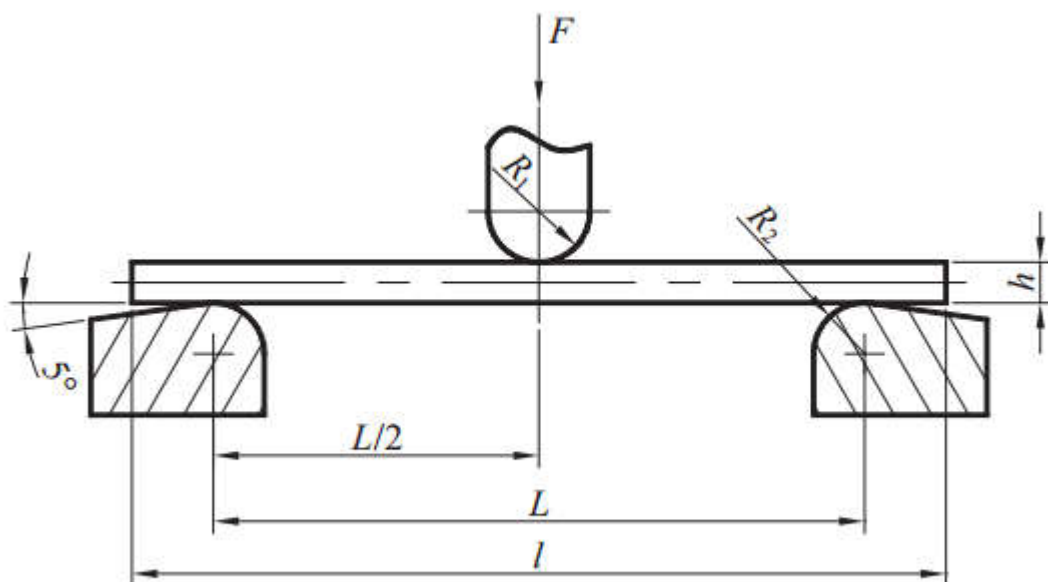
- *savojno naprezanje* σ_f [MPa] – je nominalno naprezanje vanjskog ruba površine ispitnog tijela mjereno na sredini ispitnog tijela
- *prekidno savojno naprezanje* σ_{fp} [MPa] – savojno naprezanje kod prekida ispitnog tijela
- *savojna čvrstoća* σ_{fm} [MPa] – je maksimalno savojno naprezanje na ispitnom tijelu tijekom ispitivanja
- *dogovorena (konvencionalna) granica savijanja* σ_{fc} [MPa] – je dogovorena granica savijanja kod dogovorenog progiba S_c
- *progib* S [mm] – razmak kod koje gornja ili donja površina ispitnog tijela na sredini odstupa od originalnog dijela tijekom savojnog ispitivanja

- *dogovoreni progib* S_c [mm] – je progib koji je jednak 1,5 puta debljina h ($1,5 \cdot h$) ispitnog tijela. Razmak oslonaca $L = 16 \cdot h$, dogovoreni progib odgovara savojnom istezanju od 3,5%

- *savojno istezanje* ε_f [%] – je nominalna promjena duljine na sredini vanjske površine ispitnog tijela

- *prekidno savojno istezanje* ε_{fp} [%] – savojno istezanje kod kidanja ispitnog tijela

Primjenjuje se trotočkasto ispitivanje, tj. ispitno tijelo (slika 4.13) mora biti oslonjeno na dva oslonca i opterećeno na sredini silom F , dok ispitno tijelo ne pukne ili dok progib ne postigne dogovorenu vrijednost S_c



Slika 4.13. Oblik ispitnog tijela za savojna ispitivanja

Polumjer opterećenja R_1 i polumjeri oslonca R_2 su:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm} \text{ – za ispitna tijela debljine } \leq 3 \text{ mm}$$

$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ – za ispitna tijela debljine $> 3 \text{ mm}$ – koji će se primjeniti tijekom ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada

Dimenzije ispitnog tijela:

duljina ispitnog tijela $l = 80 \pm 2$ mm

širina ispitnog tijela $b = 10 \pm 0,2$ mm

debljina ispitnog tijela $h = 4 \pm 0,2$ mm

Za savojna svojstva potrebno je izračunati prema jednadžbama:

Savojno naprezanje:

$$\sigma_f = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (4.4)$$

gdje su σ_f [MPa] – savojno naprezanje, F [N] – sila, $L = 16h = 16 \cdot 4 = 64$ [mm] – mjerna duljina tj. razmak oslonaca, b [mm] – širina, h [mm] – debljina

Savojno istezanje:

$$\varepsilon_f = \frac{6S \cdot h}{L^2} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{600S \cdot L}{L^2} \% \quad (4.6)$$

gdje su ε_f [%] – savojno istezanje, S [mm] – progib, h [mm] – debljina, L [mm] – mjerna duljina (tj. razmak oslonaca).

Za proračun modela savitljivosti, upotrebljavaju se progibi S_1 i S_2 koji odgovaraju vrijednostima savojnih istezanja $\varepsilon_{f1} = 0,05$ % i $\varepsilon_{f2} = 0,25$ % primjenjujući jednadžbe:

$$S_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6h} \quad i=1,2 \quad (4.7)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (4.8)$$

gdje su: S [mm] – progib, ε_f [%] – savojno istezanje, L [mm] – mjerna duljina (razmak oslonaca), h [mm] – debljina, E_f [MPa] – modul savitljivosti, σ_{f1} [Mpa] – savojno naprezanje mjereno na progibu S_1 , σ_{f2} [Mpa] – savojno naprezanje mjereno na progibu S_2 .

4.5 Uređaj za mjerenje mehaničkih svojstava

Za određivanje svojstava primjenjuje se kidalica *Shimadzu AGS – X* (slika 4.14). Upravljačka jedinica ima maksimalnu silu opterećenja 10 kN. Rastezna svojstva ispituju se ekstenziometrom.



Slika 4.14. Kidalica

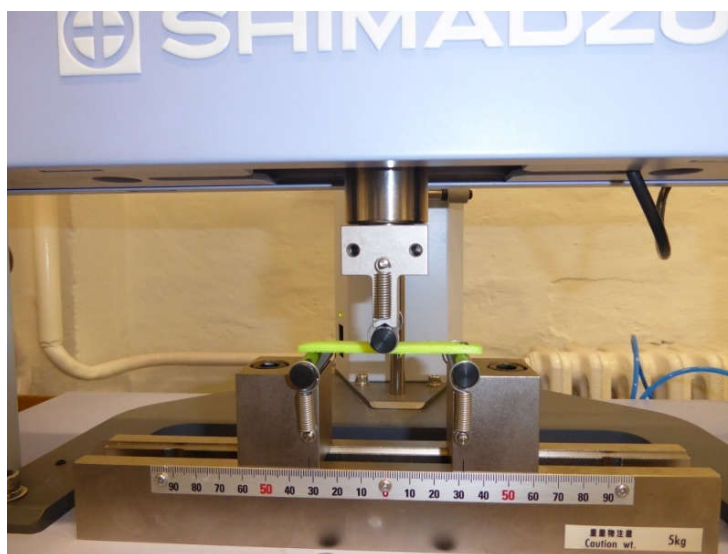
Ispitivanja se provode pri sobnoj temperaturi 22 °C.

Za određivanje rasteznih svojstava ispitno tijelo steže se u čeljusti kidalice (slika 4.15) i rasteže se silom F , pri brzini $v = 2$ mm/min.



Slika 4.15. Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava

Za ispitivanje savojnih svojstava čeljusti se razlikuju, jer je ispitno tijelo potrebno osloniti na dva oslonca i u sredini opterećivati silom F (slika 4.16). Brzina ispitivanja je $v = 5 \text{ mm/min}$



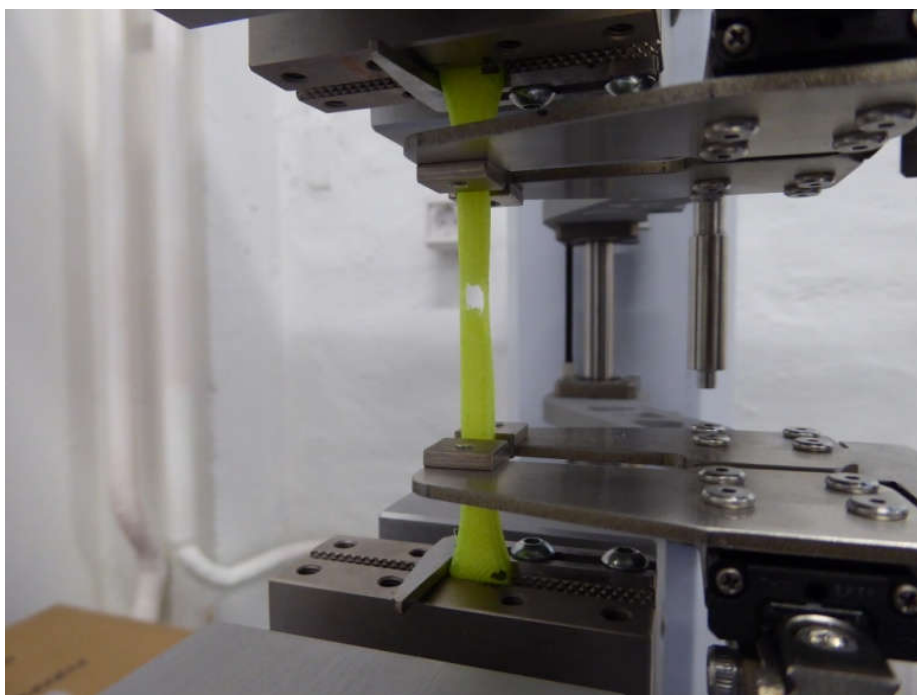
Slika 4.16. Čeljusti za ispitivanje savojnih svojstava

4.6 Ispitivanje rasteznih svojstava

Rastezno ispitivanje se provodi na kidalici, na kojemu se ispitno tijelo kontinuirano rastezno opterećuje do pojave loma. Pri ispitivanju, kontinuirano se zabilježavaju se produljenja i sila kojom se rasteže ispitno tijelo. Prvi korak je mjerenje dimenzija ispitnih tijela. Na sredini ispitnog tijela se mjere dimenzije, širina b i visina h . Ispitna

tijela nisu uvećana za postotak skupljanja PA-a, ali su prema normi odstupanja dimenzija u toleranciji. Dimenzije ispitnog tijela prikazane su u prilogu.

Nakon mjerenja upisuju se srednje vrijednosti dimenzija ispitnih tijela prema kojima se računaju mehanička svojstva. U slučaju rasteznog ispitivanja, ispitna tijela su se ponašala tako da je prvo došlo do pucanja ispune, a zatim do loma konture. S obzirom da se broj kontura može podešavati, što je u ovom slučaju iznosilo 3, prekidna čvrstoća konture nije mjerodavna veličina i ispitivanje je zaustavljeno pri prekidu ispune (slika 4.17).



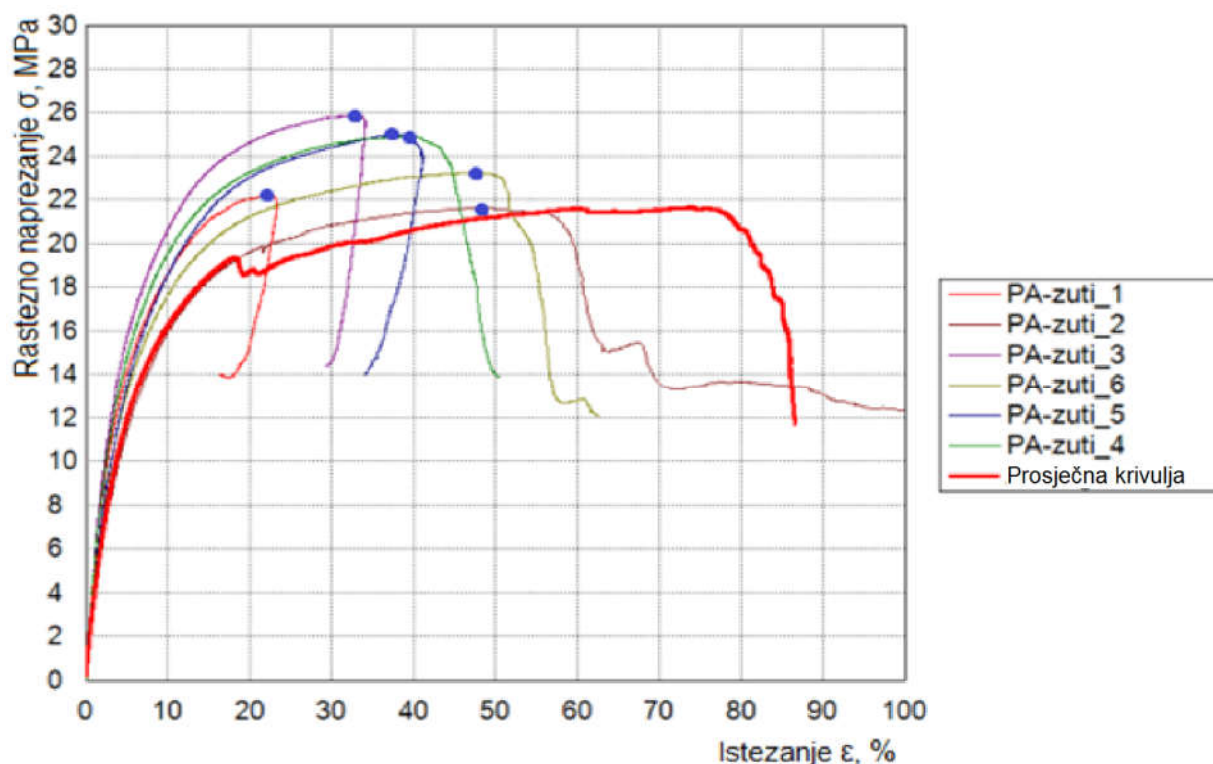
Slika 4.17. Ispitivanje rasteznih svojstava

Iz ispitivanja je zbog toga određena samo rastezna čvrstoća R_m . Dobiveni rezultati prikazani su tablicom 4.4.

Tablica 4.4 Rezultati rasteznog ispitivanja

r.b.	h , [mm]	b , [mm]	A , [mm ²]	F_{\max} [N]	R_m [MPa]	E [MPa]
1	3,71	5,35	19,82	441,06	22,22	385,16
2	3,67	5,25	19,30	416,72	21,63	299,60
3	3,76	5,17	19,42	460,92	23,24	446,20
4	3,65	5,31	19,36	483,07	24,92	405,58
5	3,76	5,20	19,56	488,72	25,00	440,10
6	3,70	5,36	19,84	502,65	25,86	361,79
\bar{X}	3,71	5,27	19,55	465,52	23,81	389,74
S	0,04	0,08	0,23	32,33	1,70	54,59

Grafički prikaz rezultata prikazan je slikom 4.18



Slika 4.18. Dijagram rastezno naprezanje – istežanje za PA

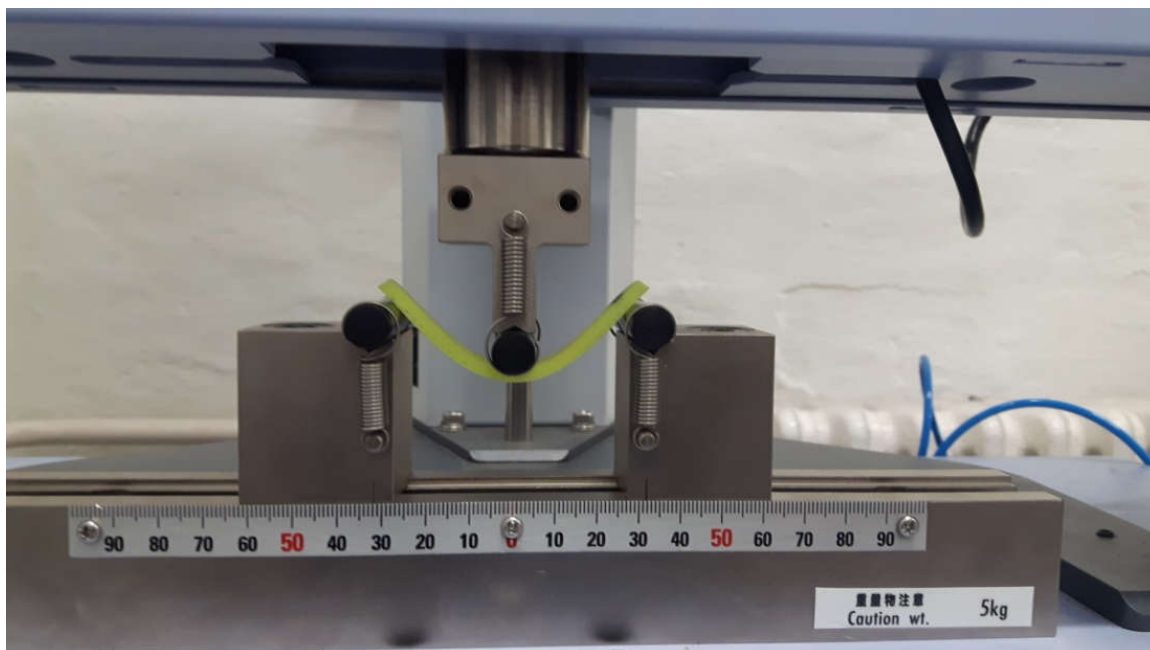
Na dijagramu su točkama na svakoj krivulji označene vrijednosti rastezne čvrstoće te je prikazana prosječna krivulja svih šest rezultata.

4.7 Ispitivanje savojnih svojstava

Savojno ispitivanje u tri točke se provodilo na istom uređaju kao i rastezno ispitivanje. Ispitivanje je provedeno na pet ispitnih tijela te je bilo potrebno izmjeriti dimenzije ispitnih tijela, širinu b i visinu h . Dimenzije su prikazane u prilogu.

Nakon mjerenja, na računalu se isto kao i kod rasteznog ispitivanja, upisuju se srednje vrijednosti dimenzija ispitnih tijela prema kojima se računaju vrijednosti savojnih svojstava. Ispitivanje se vršilo tako što se ispitno tijelo postavilo na oslonce razmaka 64 mm (slika 4.16) i opteretilo silom na sredini ispitnog tijela. Kada je ispitno tijelo preopterećeno dolazi do loma i ispitivanje se zaustavlja. Prema normi HRN EN ISO 178: 2011 ispitivanje se zaustavlja na dogovorenog progibu 6 mm ukoliko prije ne dođe do loma ispitnog tijela. U slučaju ovog ispitivanja kidalica se zaustavljala na dogovorenoj vrijednosti progiba nego je ispitivanje išlo dalje da se vidi ponašanje

ispitnog tijela. Ispitno tijelo načinjeno od PA nije puklo ni do progiba od 20 mm, odnosno neposredno prije nego ispitno tijelo ispadne iz steznih čeljusti (slika 4.19).



Slika 4.19. Ispitivanje savojnih svojstava

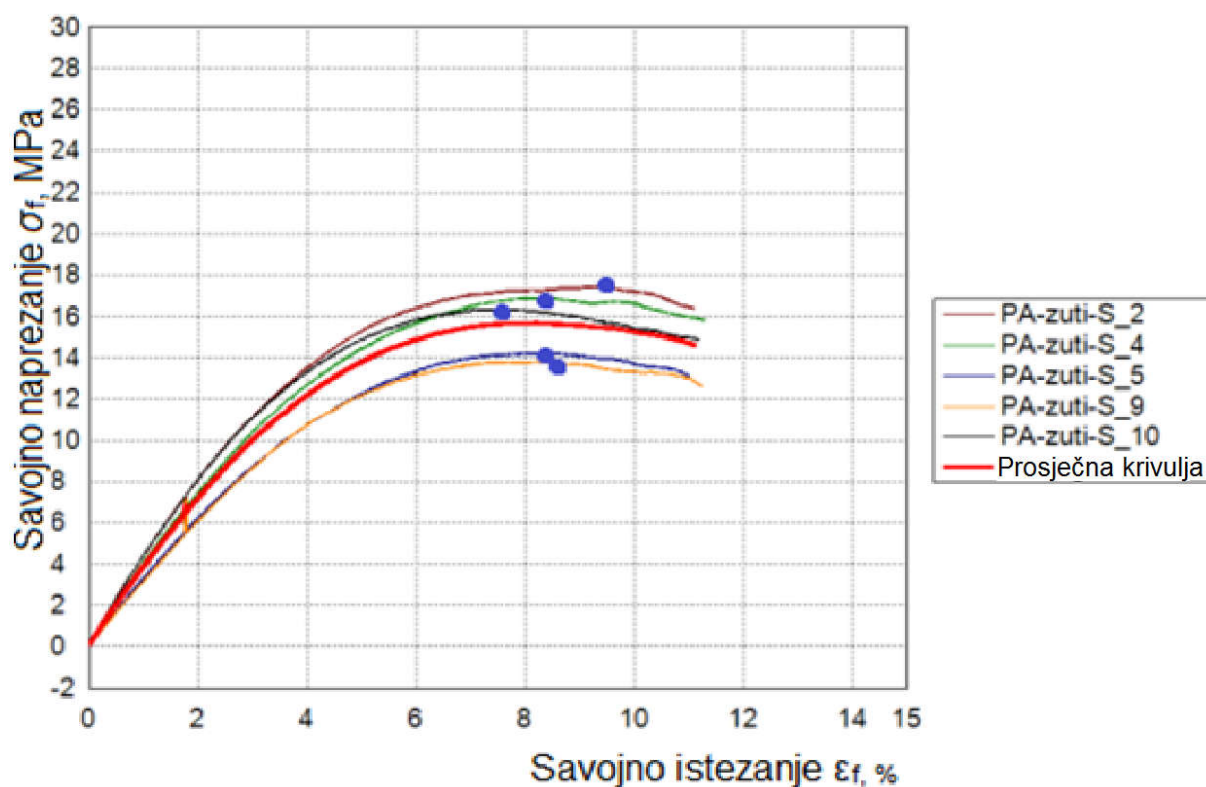
Dobiveni rezultati su prikazani tablicom 4.5

Tablica 4.5. Rezultati savojnog ispitivanja

r.b.	h , [mm]	b , [mm]	A , [mm ²]	f , [mm]	ε_{fm} , [%]	F_{max} , [N]	σ_{fm} , [Mpa]	E_s , [MPa]
2	3,79	9,72	36,84	17,21	9,55	25,41	17,47	465,03
4	3,86	9,75	37,65	14,68	8,30	25,61	16,92	424,03
5	3,76	9,83	37,01	14,83	8,17	20,65	14,26	338,44
9	3,84	9,73	37,33	14,72	8,28	20,72	13,87	320,93
10	3,82	9,65	36,91	13,47	7,54	24,02	16,38	466,18
\bar{X}	3,82	9,74	37,15	14,98	8,37	23,28	15,78	402,92
S	0,04	0,06	0,34	1,36	0,73	2,45	1,62	69,25

Ispitivanje savojnih svojstva se vršilo na više ispitnih tijela, ali ostali rezultati su izostavljeni zbog prevelikog odstupanja.

Grafički prikaz rezultata je prikazan slikom 4.20.



Slika 4.20. Dijagram savojno naprezanje – istezanje za PA

U dijagramu su točkama označene vrijednosti savojne čvrstoće, odnosno savojnog istezanja i maksimalnog progiba koji su izračunati prema jednadžbama 4.4 – 4.8 i prikazani u tablici 4.5. U dijagramu je također nacrtana prosječna krivulja rezultata svih pet ispitnih tijela

4.8 Komentar rezultata

Za usporedbu rezultata odabrana su mehanička svojstva injekcijski prešanog poliamida PA6, proizvođača *Honeywell*. Mehanička svojstva poliamida proizvođača *Honeywell* i poliamida tiskanog pisačem, proizvođača *Feelcolor* prikazana su u tablici 4.6.

Tablica 4.6. Usporedba svojstava PA ovisno o preradi

	PA6 <i>Honeywell</i>	PA6 <i>Feelcolor</i>
Rastezni modul elastičnosti E , [MPa]	2850	389,74
Rastezna čvrstoća, R_m [MPa]	79	23,81
Savojni modul elastičnosti E_s , [MPa]	3010	402,92
Savojna čvrstoća σ_{fm} , [Mpa]	110	23,28

Uvidom u tablicu, možemo zaključiti da su svojstva poliamida tiskanog postupkom taložnog očvršćivanja izraženo lošija nego svojstva poliamida koji je injekcijski prešan. Rastezni E i savojni modul elastičnosti E_s tiskanog poliamida manji je sedam puta od injekcijski prešanog poliamida, rastezna čvrstoća R_m manja je tri puta, dok je savojna čvrstoća σ_{fm} tiskanog poliamida manja od injekcijski prešanog poliamida četiri puta. Upotreba poliamida postupkom taložnog očvršćivanja sigurno nije toliko raširena kao i upotreba injekcijski prešanog poliamida, ali to i nije namjena 3D tiskanja. Pomoću 3D pisača se najčešće tiskaju prototipovi, a nakon provedenih ispitivanja mehanička svojstva su dovoljno dobra da bi se mogli tiskati konceptijski, geometrijski pa čak i u nekim slučajevima funkcionalni prototipovi.

Pri tiskanju ispitnih tijela u zavisnosti je bilo više parametara: temperatura ekstrudiranja, temperatura podloge, brzina tiskanja, debljina sloja, broj ljuski, ispuna. Parametri prerade proizvođača nisu bili dovoljni za tiskanje kvalitetnog ispitnog tijela. Preporuka je koristiti temperaturu ekstrudiranja između 240 °C i 280 °C, te temperaturu podloge između 70 °C i 80 °C. U tom velikom rasponu temperature nisu nađeni optimalni parametri za tiskanje. Prilikom izrade diplomskog rada, tiskano je više od 40 ispitnih tijela te su utvrđeni optimalni parametri prerade: temperatura ekstrudiranja 280 °C i temperatura podloge 130 °C.

5. Zaključak

Aditivnom proizvodnjom moguće je izraditi modele složene geometrije u kratkom vremenu. Cilj svakog aditivnog postupka je izraditi model što veće dimenzijske točnosti i kvalitete površine sa što manjom potrošnjom materijala u što kraćem vremenu.

U današnje vrijeme postoji jako puno različitih materijala za upotrebu u postupku taložnog očvršćivanja poput polipropilena, poliamida, polikarbonata itd. U radu je opisan postupak taložnog očvršćivanja za materijal poliamid. Ispitivanju se pristupilo da se vide potrebni parametri prerade za izradu poliamidnih proizvoda. Nakon predpokusa ustanovljene su granice temperatura ekstrudiranja i podloge koja se razlikuju od onih parametara od proizvođača. Sljedećim pokušajima došlo se do optimalnih parametara prerade pro kojima su načinjena ispitna tijela za ispitivanje mehaničkih svojstava. Uzimajući u obzir rezultate iz prošlog poglavlja dolazi se do zaključka da mehanička svojstva materijala tiskana s 3D pisačem nisu slična svojstvima rađena injekcijskim prešanjem, odnosno ona su puno manja. Takav rezultat vjerojatno je i posljedica parametara tiskanja zbog kojih može doći do velike razlike u rezultatima. U radu je bio cilj napraviti što kvalitetnije ispitno tijelo, koje se najmanje vitoperi i koje ima kvalitetnu površinu. Zanimljivo bi bilo provesti istraživanje na nekom industrijskom FDM pisaču i istraživanje vezano za utjecaj parametara tiskanja ne samo temperature ekstrudiranja i temperature podloge nego i brzine tiskanja, debljine sloja, ispune, gustoće sa mehaničkim svojstvima, pa čak i probati tiskati u grijanoj komori koju nažalost *MakerBot Replicator 2x* nema.

6. Literatura

1. Pilipović, A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
2. http://www.noven.hr/priprema_planiranje_format.htm, 20.05.2016
3. Šimunić, N., Benić, Z., Brozović, M.: *Postupci brze izrade prototipova*, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2012.
4. <http://instatuts.com/featured/a-rapid-prototyping-and-stl-informative-guide>, 20.05.2016.
5. <http://www.robaid.com/tech/organovo-3d-bio-printer-can-make-human-tissue-and-organs.htm>, 20.05.2016.
6. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2010.
7. Vrbanić, D.: *Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2012.
8. <http://www.3dprintingtech.cc/speed-or-quality-the-correct-3d-printing-parameters-for-best-result/>, 28.05.2016
9. <http://3dprinting-blog.com/tag/3d-printing-parameters/>, 28.05.2016
10. <https://3dprint.com/82668/infill-shells-3d-printing/>, 28.05.2016
11. <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>, 28.05.2016
12. Iyibilgin O., Leu M. C., Yigit C., *Experimental investigation od different cellular lattice structures manufactured by fused deposition modeling*, Austin, 2012.
13. <http://www.incept3d.com/largerobust--fdm.html>, 12.06.2016
14. <http://reprap.org/wiki/Polycarbonate>, 12.06.2016
15. Radoš I., *Usporedba niskobudžetnih printera*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014
16. <http://www.stratasys.com/materials/fdm>, 25.06.2016
17. <http://www.rapidmodel.com.my/portfolio-item/pc-abs/>, 25.06.2016

18. <https://filaments.ca/pages/temperature-guide>, 25.06.2016
19. <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>, 26.06.2016
20. http://www.thingzcube.com/index.php?route=product/product&product_id=57, 26.06.2016
21. <http://nicklievendag.com/filament-guide/>, 26.06.2016
22. <https://3dprint.com/28808/conductive-tpu-filament/>, 26.06.2016
23. <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2009/2009-49-Espalin.pdf>, 26.06.2016
24. HRN EN ISO 527: 2012 Plastika – Određivanje rasteznih svojstava (ISO 527: 2012, EN ISO 527: 2012)
25. HRN EN ISO 178: 2011 Plastika – Određivanje savojnih svojstava (ISO 178: 2010, EN ISO 178: 2010)
26. <https://www.honeywell-nylon6.com/literature/>, 27.06.2016.

7. Prilog

Tablica 7.1 Prikaz širine i debljine ispitnih tijela kod rasteznog ispitivanja

r.b.	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	\bar{h} [mm]	S	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	\bar{b} [mm]	S
1	3,68	3,71	3,73	3,71	0,03	5,37	5,32	5,35	5,35	0,03
2	3,65	3,68	3,69	3,67	0,02	5,36	5,22	5,18	5,25	0,09
3	3,71	3,8	3,76	3,76	0,05	5,21	5,16	5,14	5,17	0,04
4	3,64	3,68	3,62	3,65	0,03	5,36	5,28	5,29	5,31	0,04
5	3,78	3,76	3,74	3,76	0,02	5,19	5,2	5,22	5,20	0,02
6	3,69	3,68	3,74	3,70	0,03	5,39	5,43	5,25	5,36	0,09

Tablica 7.2 Prikaz širine i debljine ispitnih tijela kod savojnog ispitivanja

r.b.	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	\bar{h} [mm]	S	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	\bar{b} [mm]	S
2	3,75	3,79	3,83	3,79	0,04	9,72	9,76	9,68	9,72	0,04
4	3,88	3,85	3,86	3,86	0,02	9,86	9,78	9,6	9,75	0,13
5	3,78	3,76	3,75	3,76	0,02	9,7	9,86	9,94	9,83	0,12
9	3,88	3,81	3,82	3,84	0,04	9,73	9,73	9,73	9,73	0,00
10	3,85	3,81	3,81	3,82	0,02	9,7	9,65	9,61	9,65	0,05